

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Determinação das perdas adicionais em carga de
motores de indução trifásicos por recurso ao
ensaio Eh-star - análise crítica**

Octávio Jorge Guerreiro da Cunha

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel de Araújo Sá

Julho de 2009

Resumo

A eficiência energética dos equipamentos eléctricos é, hoje, um dos principais factores que influenciam cada vez mais a competitividade entre as indústrias. A conveniente escolha e dimensionamento dos equipamentos são, portanto, um dos desafios que as indústrias em geral enfrentam. Esta questão assume especial interesse em motores de indução trifásicos, uma vez que estes, são responsáveis por uma fatia elevada do consumo de energia eléctrica no mundo (cerca de 40%).

Deste modo, o mercado de equipamentos eléctricos deve estar preparado para poder dar respostas a estas novas necessidades. Para tal, é preciso que haja regulamentação que defina padrões que sejam universais para todos os mercados. É neste seguimento que surge a norma de ensaio de motores de indução IEC 60034-2-1 e na qual se baseia esta dissertação.

Nesta dissertação é feito um estudo da norma em questão e, posteriormente, são implementados os ensaios prescritos pela norma para determinar a eficiência de um motor de indução trifásico. É posto especial enfoque ao método para determinação das chamadas perdas adicionais em carga, método Eh-star. Dado que não existe ainda experiência suficiente na implementação em laboratório deste ensaio, pretendeu-se fazer uma análise crítica da mesma. Para tal, este estudo foi dividido nas seguintes etapas:

- Estudo das normas necessárias à determinação da eficiência de um motor de indução particularmente nos aspectos e procedimentos relativos à determinação experimental das suas perdas adicionais em carga.
- Realização de ensaios complementares para obtenção dos dados necessários para o tratamento de resultados do ensaio Eh-star.
- Elaboração de um algoritmo de tratamento de resultados do ensaio Eh-star.
- Implementação em laboratório do método Eh-star.
- Análise de resultados.

Abstract

The energy efficiency of electrical equipment is nowadays, one of the main factors influencing the increasing competitiveness among industries. The selection and sizing of equipments is therefore one of the industry challenges. These issues are particularly important for three phase induction motors, since those are responsible for a high share of electricity consumption in the world (about 40%).

Thus, the electrical equipment market must be prepared to answer to these new needs. It is needed to define legislation for universal standards for all countries. In this following appeared the new standard IEC60034-2-1 and in which will be the base of this dissertation.

In this report is done a study of that standard in question and, subsequently, are implemented tests prescribed by the standard to determine the electrical efficiency of an three-phase induction motor. Special focus is given to the method for determining additional load losses, Eh-star method. There isn't still sufficient experience in implementing this test in laboratory, we set out to make a critical analysis of it. According to this aim, this study was divided into the following steps:

- Study the standards necessary to determine the efficiency of an induction motor.
- Carrying out further testing to obtain data necessary for the results treatment of the Eh-star test.
- Development of an algorithm for the post-processing of Eh-star test results.
- Laboratory Implementation of the Eh-star test method.
- Analysis of results.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Carlos Manuel de Araújo Sá, pela oportunidade que me deu de desenvolver este trabalho, pela disponibilidade e incentivo demonstrados ao longo da sua realização.

Aos meus amigos e colegas de curso, pelo apoio e sugestões, especialmente, ao Joel Ramires, José Silva e Agostinho Moreira.

O meu muito obrigado ao Florindo Sousa pela ajuda que me prestou na realização dos ensaios no laboratório.

E, finalmente, à minha família pela oportunidade que me deu de prosseguir os estudos e concluir mais esta etapa da minha vida.

A todos,
o meu muito obrigado.

Índice

Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1- Estrutura da dissertação	2
Capítulo 2	3
Eficiência energética em motores eléctricos	3
2.1- Introdução	3
2.2- Breve história do motor de indução	4
2.3- Mercado de motores de indução	5
2.4- Consumo energético dos motores.....	8
2.5- Procedimentos de ensaio para determinação da eficiência	8
2.6- Requisitos de desempenho obrigatórios e voluntários.....	10
2.7- Classes de eficiência, sistemas de marcação e etiquetagem	15
Capítulo 3	17
Perdas adicionais em máquinas de indução.....	17
3.1- Introdução	17
3.2- Origem das perdas	18
3.3- Componentes das perdas.....	18
3.3.1- Conclusão	19
3.4- Efeitos das perdas adicionais em carga.....	20
3.4.1- Aquecimento.....	20
3.4.2- Perdas de binário	20
3.4.3- Aceleração e desaceleração.....	21
3.4.4- Eficiência.....	21
3.4.5- Características nominais.....	21
3.5- Métodos actuais para determinação das perdas adicionais em carga.....	22
3.5.1- Métodos directos	22
3.5.1.1- Método entrada-saída.....	22
3.5.1.2- Método Pump-back	23
3.5.1.3- Método calorimétrico	23
3.5.2- Métodos indirectos.....	23
3.5.2.1- Método em oposição (back-to-back)	23
3.5.2.2- Método de curto-circuito AC/DC	24
3.5.2.3- Método de rotação inversa.....	25

3.5.2.4- Método Eh-star	25
Capítulo 4	27
Método Eh-star	27
4.1- Introdução.....	27
4.1.1- Funcionamento assimétrico.....	28
4.2- Requisitos de ensaio	29
4.2.1- Condições eléctricas de operação durante o ensaio Eh-star.....	30
4.2.1.1- Forma e simetria das tensões	30
4.2.1.2- Variações de frequência e de tensão durante o ensaio Eh-star.....	30
4.2.2- Instrumentação	30
4.3- Procedimentos de ensaio	31
4.4- Determinação das perdas adicionais	32
4.5- O problema da incerteza	34
4.5.1- Programa de ensaios	34
4.5.1.1- Parte 1	35
4.5.1.2- Parte 2	35
4.5.1.3- Parte 3	35
4.5.2- Resultados	35
Capítulo 5	37
Actividade laboratorial	37
5.1- Introdução.....	37
5.2- Caracterização laboratorial	38
5.3- Características do motor.....	38
5.4- Fonte de alimentação	39
5.4.1- Caracterização genérica.....	39
5.4.2- Grupo motor-gerador	39
5.4.3- Auto-transformador	40
5.4.4- Factor de distorção harmónica	41
5.4.4.1- Análise da onda de tensão com a fonte em vazio.....	41
5.4.4.2- Análise da tensão e da corrente com o motor à plena carga	43
5.4.4.3- Análise da tensão e da corrente com o motor a meia carga	46
5.4.4.4- Conclusão.....	48
5.5- Banca de ensaio	48
5.5.1- Balança de medição de binário.....	51
5.5.1.1- Sistema de indicação de binário	51
5.6- Equipamentos de medida utilizados	52
5.6.1- Banca de medida de resistência eléctrica.....	52
5.6.2- Medida de grandezas eléctricas	53
5.6.3- Medição da velocidade.....	53
5.6.4- Medição da temperatura	54
5.6.5- Osciloscópio	54
5.7- Cálculo da resistência do estator.....	54
5.7.1- Ligação em triângulo.....	56
5.7.2- Ligação em estrela	56
5.8- Ensaio de aquecimento.....	57
5.8.1- Sistema de aquisição de temperatura.....	58

5.8.2- Procedimentos e condições de ensaio	60
5.8.3- Resultados do ensaio	62
5.9- Ensaio em vazio.....	64
5.9.1- Resultados.....	67
5.9.1.1- Determinação das perdas mecânicas.....	68
5.9.1.2- Determinação das perdas magnéticas.....	68
5.9.2- Conclusões	69
5.10- Ensaio em carga	69
5.10.1- Determinação das perdas por efeito de Joule no enrolamento do estator.....	70
5.10.2- Determinação das perdas por efeito de Joule no enrolamento do rotor	70
5.10.3- Resultados do ensaio.....	71
5.10.4- Conclusões	71
5.11- Ensaio Eh-star	72
5.11.1- Determinação da resistência R'_{eh}	72
5.11.2- Determinação da corrente e da tensão de teste	72
5.11.3- Determinação da resistência de teste R_{vw}	72
5.11.4- Registo de medidas.....	73
5.11.5- Resultados	75
5.12- Análise de resultados.....	77
5.12.1- Influência da temperatura nas perdas adicionais em carga	78
5.12.2- Influência da resistência R_{eh} nas perdas adicionais em carga	79
5.12.3- Conclusões.....	80
Capítulo 6	81
Análise crítica e conclusões	81
6.1- Dificuldades	81
6.2- Prós e contras do método Eh-star	82
6.2.1- Prós	82
6.2.2- Contras	82
6.3- Discussão.....	82
6.4- Trabalhos futuros.....	83

Lista de figuras

Figura 2.1: Motor de indução de Ferraris e Tesla [4].....	4
Figura 2.2: Motor de indução de Tesla e actual [5, 6].	5
Figura 2.3 - Quota de mercado (unidades) por tipo de motor na Europa EU-25 (2006) [11]	6
Figura 2.4 - Quota de vendas de motores AC na Europa EU-25 2006 [11].	7
Figura 2.5: Consumo eléctrico no mundo [9].	8
Figura 2.6- Valores padrão para as perdas adicionais em carga IEC 61972 [9]	10
Figura 2.7 - Efeito dos MEPS obrigatórios e da etiquetagem/marcação da classe de rendimento no mercado dos motores eléctricos [17].	11
Figura 2.8- Mercado de motores de indução nos EUA em 2005 [17].	11
Figura 2.9 - Classes de eficiência dos acordos CEMEP/EU [11].	12
Figura 2.10 Total das vendas de motores de indução por parte dos membros da CEMEP, no período entre 1998 e 2006 (Fonte: CEMEP, 2008) [17].	13
Figura 2.11 - Comparação do mercado de motores de alta eficiência entre EUA e EU em 2005 [17].	14
Figura 2.12- Classes Eficiência Energética IEC 60034-30 [9].	15
Figura 3.1 - Linhas de campo do fluxo de fugas no rotor e estator.	19
Figura 3.2 - Característica binário-velocidade de uma máquina de indução [16].	20
Figura 4.1 - Circuito de ensaio Eh-star [25].....	27
Figura 4.2 - Circuito assimétrico equivalente.	28
Figura 4.3 - Máquinas equivalentes simulando o ensaio Eh-star.	28
Figura 4.4 - Circuito equivalente em T da máquina de indução [29].	32
Figura 4.5 - Linearização dos dados das perdas residuais.	33
Figura 5.1 - Motor ensaiado.	38
Figura 5.2 - Grupo Motor-Gerador.	40
Figura 5.3 - Auto-transformador.....	41
Figura 5.4 - Sistema trifásico de tensões da fonte de alimentação em vazio.	42
Figura 5.5 - Espectro do sistema de tensões gerado em vazio.....	42
Figura 5.6 - Sistema trifásico de tensões com o motor à plena carga.	43
Figura 5.7 - Espectro da tensão com o motor à plena carga.	44
Figura 5.8- Forma de onda da corrente na fase U.	45
Figura 5.9 - Espectro da corrente com o motor à plena carga.....	45
Figura 5.10 - Sistema de tensões com o motor a meia carga.	46

Figura 5.11 - Espectro da tensão com o motor a meia carga.	46
Figura 5.12 - Forma de onda da corrente com o motor a meia carga.	47
Figura 5.13 - Espectro da corrente com o motor a meia carga.	48
Figura 5.14 - Aspecto geral da banca de ensaios.	49
Figura 5.15 - Esquema de princípio da banca de ensaios.	49
Figura 5.16 - Balança de medição de binário	51
Figura 5.17 - Esquema do mecanismo de indicação de binário [32].	52
Figura 5.18 - Diagrama de ligação do analisador de potência.	53
Figura 5.19- Esquema de medição da resistência do estator.	54
Figura 5.20 - Ligação em triângulo.	56
Figura 5.21- Ligação em estrela.	56
Figura 5.22 - Esquema de montagem do ensaio de aquecimento.	57
Figura 5.23 - Curva de aquecimento típico de um motor (com $\Delta T_0 = 0$).	58
Figura 5.24 - Localização da sonda térmica do tipo K.	59
Figura 5.25 - Fotografia térmica do motor.	59
Figura 5.26 - Localização das sondas tipo K.	60
Figura 5.27 - Montagem do ensaio de aquecimento.	60
Figura 5.28 - Variação de frequência ao longo do ensaio.	62
Figura 5.29 - Variação de tensão ao longo do ensaio.	63
Figura 5.30 - Variação de binário ao longo do ensaio.	63
Figura 5.31 - Registo de temperatura.	64
Figura 5.32 - Circuito equivalente do motor em vazio.	65
Figura 5.33 - Esquema de montagem do ensaio em vazio.	65
Figura 5.34 - Distribuição das perdas em função da tensão.	66
Figura 5.35 - Curvas de ensaio.	67
Figura 5.36 - Extrapolação das perdas mecânicas.	68
Figura 5.37 - Determinação gráfica das perdas no ferro.	68
Figura 5.38- Esquema de montagem do ensaio em carga.	69
Figura 5.39 - Curvas de ensaio em carga.	71
Figura 5.40 - Linearização da resistência R_{vw}	72
Figura 5.41 - Resistência R_{vw} em função da corrente de teste.	73
Figura 5.42 - Montagem em laboratório do ensaio Eh.star.	74
Figura 5.43 - Folha de cálculo do ensaio Eh-star.	76
Figura 5.44 - Regressão linear para determinação das perdas adicionais.	77
Figura 5.45 - Variação das perdas adicionais com a temperatura.	79
Figura 5.46 - Variação das perdas adicionais em carga com a resistência R_{eh}	79
Figura 5.47 - Variação da corrente com a resistência R_{eh}	80

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Informação de Mercado EU-15 (2006) [11].	7
Tabela 2.2- Mercado EU-25 e EU-15 (2006) [11].	7
Tabela 2.3 - Regulamentação e acordos voluntários sobre eficiência em motores de indução [17].	14
Tabela 3.1 - Resultados de algumas experiências de vários autores [24].	21
Tabela 4.1 - Tensão e corrente de teste.	29
Tabela 4.2 - Valores típicos de R'_{eh} .	29
Tabela 5.1- Características gerais do motor.	39
Tabela 5.2 - Características das máquinas do grupo motor-gerador.	40
Tabela 5.3 - Características gerais do Auto-transformador.	41
Tabela 5.4 - Análise espectral da onda gerada em vazio.	43
Tabela 5.5 - Análise espectral da tensão gerada com o motor à plena carga.	44
Tabela 5.6 - Análise espectral da corrente com o motor à plena carga.	46
Tabela 5.7 - Análise espectral da tensão com o motor a meia carga.	47
Tabela 5.8 - Análise espectral da corrente com o motor a meia carga.	48
Tabela 5.9 - Caracterização dos aparelhos de medida da banca de medição da resistência.	52
Tabela 5.10 - Limites de erro do analisador de potência.	53
Tabela 5.11 - Especificações do aparelho de medição da velocidade.	53
Tabela 5.12 - Caracterização dos aparelhos de medição da temperatura.	54
Tabela 5.13 - Caracterização da câmara termográfica.	54
Tabela 5.14 - Caracterização do Osciloscópio.	54
Tabela 5.15 - Resistência dos condutores de ligação (a 18°C).	55
Tabela 5.16 - Resistência de fase dos enrolamentos estatóricos (a 18°C).	55
Tabela 5.17 - Resistência de linha para ligação dos enrolamentos do estator em triângulo (a 18°C).	56
Tabela 5.18 - Resistência de linha para ligação dos enrolamentos do estator em estrela.	57
Tabela 5.19 - Intervalo de tempo.	62
Tabela 5.20 - Resistência do estator a quente.	64
Tabela 5.21 - Registo de medidas do ensaio em vazio.	67
Tabela 5.22 - Registo de medidas do ensaio em carga.	71
Tabela 5.23 - Registo de medidas do ensaio Eh-star.	75
Tabela 5.24 - Resultados do ensaio Eh-star.	77

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas:

ACEEE - American Council for an Energy-Efficient Economy
BS - British Standards
CEMEP - Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics
CENELEC - European Committee for Electrotechnical Standardization
CSA - Canadian Standards Association
Epact - Energy Policy Act
EU- União Europeia
EUA - Estados Unidos da América
HVF - Harmonic Voltage Factor
IEC - International Electrotechnical Commission
IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers
IEA - International Energy Agency
IM - Motor de Indução
JEC - Japanese Electrotechnical Committee
JIS - Japan Industrial Standard
MEPS - Mandatory Minimum Energy Performance Standards
NEMA - National Electrical Manufacturers Association
OEM - Original Equipment Manufacturer
VEV - Variador Electrónico de velocidade
WG - Work Group

Lista de símbolos:

AC - corrente alternada
DC - corrente continua
 f - frequência de alimentação, Hz
 I - corrente de linha, A
 k_{θ} - factor de correcção da temperatura
 n - velocidade de operação, rpm

n_s - velocidade de sincronismo, rpm
 P_0 - potência absorvida em vazio, W
 P_{fw} - perdas por atrito e ventilação, W
 p_{Fe} - perdas no ferro, W
 p_r - perdas por efeito de Joule no rotor, W
 p_s - perdas por efeito de Joule no estator, W
 P_{el} - potência eléctrica absorvida, W
 P_{mec} - potência mecânica, W
 p_{sep} - perdas separadas, W
 p_t - Perdas totais, W
 p_{ad} - perdas adicionais em carga
 p_{rot} - perdas rotacionais, W
 R_s - Resistência do estator, Ω
 R_L - Resistência de linha, Ω
 R'_{eh} - valor típico da resistência auxiliar, Ω
 R_{eh} - valor actual da resistência auxiliar usada no ensaio eh-star, Ω
 s - deslizamento
 T - binário mecânico, N.m
 U_N - Tensão estipulada, V
 U_0 - Tensão em vazio, V
 Z - impedância, Ω
 η - eficiência

Lista de índices

f_f - frequência fundamental
 r - rotor
 s - estator
 U, V, W - designação das fases
 (1) - componente directa
 (2) - componente inversa

Capítulo 1

Introdução

A poupança de energia é hoje em dia, um factor importantíssimo na competitividade da indústria e nas empresas em geral. A escolha de equipamentos com eficiência energética cada vez maior é, portanto, essencial, não só aquando do projecto de instalações novas, mas também, na substituição de equipamentos antigos. A fatia de equipamentos vendidos, entenda-se, motores de indução, para substituição de equipamentos antigos é muito superior à quantidade vendida para novas instalações, sobretudo na Europa. Isto é razão suficiente para que se faça uma sensibilização a nível mundial acerca da utilização de equipamentos mais eficientes. Outro ponto importante é o correcto dimensionamento dos equipamentos, pois verifica-se que a grande maioria dos motores de indução instalados encontra-se a funcionar em regimes de carga muito abaixo da sua carga estipulada.

Assim, é necessário que o mercado esteja preparado para poder fornecer ao consumidor toda a informação sobre os equipamentos que coloca no mercado e, acima de tudo, que a informação seja clara e não seja susceptível de colocar ainda mais dúvidas ao consumidor. É imperioso que a comunidade internacional seja capaz de reunir esforços, de forma a encontrar plataformas de entendimento quanto às principais questões com que se debate a indústria, e os consumidores de motores em geral e dos motores de indução em particular.

Uma das grandes questões que têm dividido a comunidade internacional é a questão dos métodos de ensaio para a determinação do rendimento dos motores de indução. À data da elaboração da presente dissertação, já se encontra em vigor uma norma aceite por toda a comunidade, a designada IEC60034-2-1, que é a base desta dissertação. Esta norma é já resultado de um entendimento em relação aos métodos de ensaio, embora ainda existam muitas questões em aberto em relação à mesma. Nomeadamente, em relação às questões de incerteza e dos custos associados ao ensaio Eh-star. O método Eh-star é ainda mencionado na norma como um método de média incerteza o que, teoricamente, eliminaria o ensaio do leque de ensaios aceites para determinação do rendimento, uma vez que a mesma norma aconselha o uso de métodos de baixa incerteza. Neste contexto, surgiu um programa de testes, conhecido como “*Round-robin tests*”, patrocinado pela IEC com o objectivo, entre outros, de confirmar o ensaio Eh-star com um ensaio capaz de se equiparar ao método B da norma IEEE 112.

É no contexto do parágrafo anterior que surge também esta dissertação. Pretende-se pois, fazer a implementação em laboratório do ensaio Eh-star, assim como os ensaios complementares necessários à realização do mesmo, e identificar as dificuldades que possam constituir um obstáculo à implementação do mesmo. Não se pretende portanto efectuar um estudo aprofundado dos fundamentos do método ou das variáveis que influenciam os seus resultados, mas sim, tentar colocarmo-nos na posição de um técnico que tenha de efectuar um ensaio nas condições determinadas pela norma.

1.1-Estrutura da dissertação

A dissertação é composta por seis capítulos. No primeiro capítulo é feito um enquadramento do trabalho efectuado e os objectivos inerentes à realização da dissertação.

No segundo capítulo pretende-se fazer uma breve descrição da situação mundial do mercado de motores e das normas que o regem. Faz-se uma breve referência ao surgimento da máquina de indução em finais do século dezanove e das semelhanças com as actuais, caracteriza-se o mercado de motores de indução e as suas aplicações assim como os consumos de energia dos mesmos. Aborda-se ainda, a questão da importância da normalização dos procedimentos de ensaio para determinação da eficiência dos motores e da sua etiquetagem e marcação.

No terceiro capítulo faz-se uma introdução às perdas adicionais em carga. O objectivo deste capítulo é fazer uma breve apresentação das origens das perdas adicionais em carga, as suas componentes, os efeitos que elas acarretam no desempenho dos motores e os diversos métodos de as determinar.

O quarto capítulo é dedicado ao método de ensaio Eh-star. Nele se descrevem os requisitos necessários à implementação e realização do ensaio e os procedimentos de ensaio e de determinação das perdas. No final faz-se uma breve referência ao programa de ensaios que a IEC tem estado a desenvolver e que tem como enfoque o ensaio Eh-star.

O capítulo cinco é dedicado à actividade experimental realizada durante a elaboração da dissertação. Este capítulo é destinado essencialmente a apresentar os resultados obtidos com os diversos ensaios realizados.

Por último, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões a que os ensaios realizados conduziram e é feita uma análise crítica da actividade laboratorial.

Capítulo 2

Eficiência energética em motores eléctricos

2.1-Introdução

Um dos grandes dilemas que se vive hoje em dia é, sem dúvida, o facto do desenvolvimento que a civilização actual viveu, desde o início do século dezanove, ser cimentado e centrado no aproveitamento das energias fósseis de que dispomos e ser também, esse desenvolvimento, a ameaça ao equilíbrio do nosso planeta. Nos dias de hoje, devido à falta de incentivos e, essencialmente ao alheamento da sociedade das questões ambientais, deparamo-nos com um cenário bastante negro. Por um lado, a procura de energia cresce significativamente de ano para ano e, por outro lado, torna-se urgente tomar medidas com vista a reduzir efectivamente as emissões de gases de efeito de estufa. Estão criadas as condições para que se juntem esforços a nível mundial para tomar medidas de eficiência energética.

Dados da Agência Internacional da Energia (IEA) apontam para um consumo global, por parte dos motores eléctricos de cerca de 40% de toda a energia eléctrica consumida no mundo, sem contar com a energia consumida pelos aparelhos electrodomésticos. Estima-se que com a utilização de motores mais eficientes, conjuntamente com sistemas motrizes optimizados, obter-se-ia uma poupança da ordem dos 7% do total da energia consumida no mundo, o que representa um potencial de eficiência energética de 20 a 30% [1,2].

Apesar deste elevado potencial, existem ainda muitas barreiras que impedem o seu aproveitamento. Neste seguimento, é urgente investir na informação e sensibilização dos consumidores finais e dos técnicos responsáveis pelos projectos das instalações, acerca da importância de um correcto dimensionamento dos sistemas motrizes e da substituição de motores antigos por motores mais eficientes e adequados à carga que accionam. A aversão dos consumidores finais em efectuar investimentos iniciais mais avultados, mesmo que recuperáveis num curto período de tempo, é também uma séria barreira.

Por outro lado, a falta de consenso entre associações de fabricantes a nível mundial, nomeadamente a NEMA e o CEMEP, acerca dos procedimentos e normas de determinação da eficiência dos motores de indução, traduzido na não ratificação por parte do CENELEC de normas aprovadas a nível do IEC, levou à adopção de diferentes métodos o que conduziu a diferentes resultados de eficiências para um mesmo motor. Isto criou alguma falta de transparência no mercado, devido à ausência de etiquetas claras e padronizadas, que permitam uma correcta escolha do equipamento por parte do utilizador.

Sendo os motores eléctricos comercializados em grandes quantidades em todo o mundo, com mercados emergentes como a China a importar milhares de motores todos os anos, é crucial a existência de normas de comparação de qualidade dos produtos. As normas devem incluir procedimentos de ensaios, classes de eficiência energética, sistemas de etiquetagem e normas de desempenho mínimo. É, portanto, necessária a cooperação de todos os agentes do mercado, como fabricantes e suas associações, distribuidores, fabricantes de equipamentos originais (OEM), utilizadores finais, governos e associações internacionais de normalização.

2.2-Breve história do motor de indução

Deve-se a Faraday e a Maxwell a descoberta das leis fundamentais que permitiram a invenção da máquina de indução. Faraday descobriu a lei da indução electromagnética por volta de 1831 e Maxwell formulou as leis da electricidade (ou equações de Maxwell) em torno de 1860. Por esta altura estavam criadas as condições para que se inventasse a máquina de indução. Esta é apresentada ao mundo mais de duas décadas depois de Maxwell ter formulado as leis da electricidade e teve dois pais: Galileo Ferraris (1885) e Nicola Tesla (1886) [3].

Em 1882, Nikola Tesla descobriu o campo magnético rotativo, um princípio fundamental em física e uma das maiores descobertas de todos os tempos. Em Fevereiro de 1882, Nikola Tesla estava a caminhar no parque da cidade de Budapeste, Hungria quando obteve a solução para o enigma do campo magnético rotativo, a qual procurava há muito tempo. No verão de 1883, Tesla estava a trabalhar em Estrasburgo, França, onde construiu e viu funcionar o seu primeiro modelo actual do motor indução [4]. As máquinas de indução de Ferraris e Tesla são mostradas na Figura 2.1.

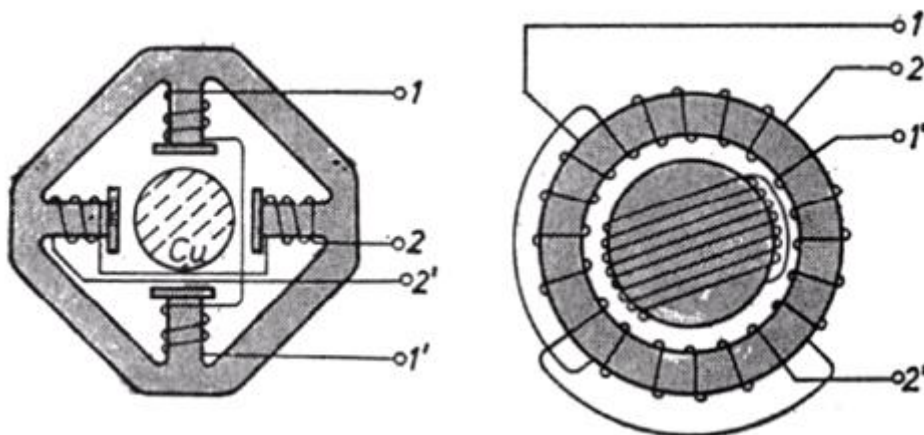


Figura 2.1: Motor de indução de Ferraris e Tesla [4].

Ambos os motores eram alimentados a partir de uma fonte de energia AC bifásica e, portanto, continham dois enrolamentos concentrados 1-1' e 2-2' sobre o núcleo ferromagnético do estator [3].

Na patente de Ferraris o rotor era feito de um cilindro de cobre, enquanto que na patente de Tesla o rotor era feito de um cilindro termomagnético com um enrolamento em curto-circuito. Embora os motores de indução contemporâneos tenham topologias mais elaboradas (Figura 2.2) e o seu desempenho seja muito melhor, o princípio manteve-se basicamente inalterado

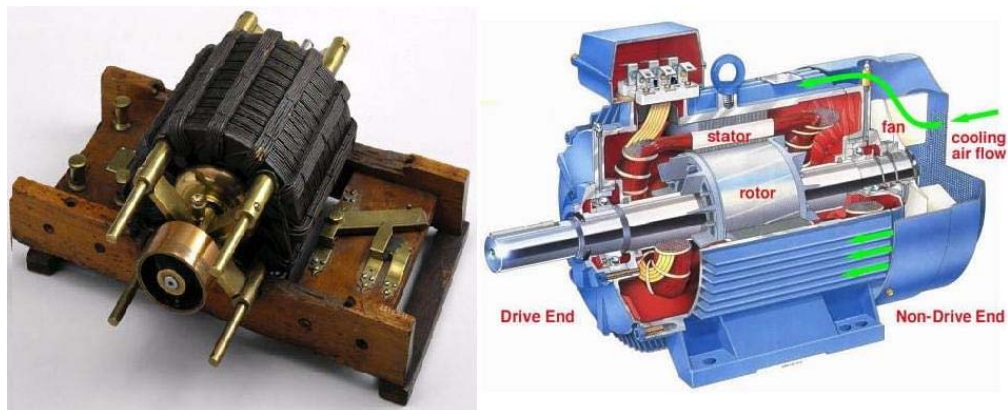


Figura 2.2: Motor de indução de Tesla e actual [5, 6].

Ou seja, um enrolamento polifásico AC no estator produz um campo de giratório o que induz forças electromotrizes que por sua vez produzem correntes no enrolamento curto-circuitado do rotor. A interacção entre o campo produzido pelo estator e as correntes induzidas no rotor produz binário fazendo assim o motor funcionar. Como o binário não é nulo quando a velocidade do rotor é zero, o motor de indução começa a rodar.

Em 1889, Dolivo-Dobrovolsky inventou o rotor em gaiola com uma topologia muito similar à utilizada hoje em dia. Inventou também o rotor de dupla gaiola.

2.3-Mercado de motores de indução

O motor de indução deu os primeiros passos em aplicações industriais no início do século vinte. Apesar deste início promissor, os motores de indução foram substituídos pelos motores de corrente continua nas aplicações de transportes. Só a partir de meados da década de oitenta, com o grande desenvolvimento no campo da electrónica de potência, é que o motor de indução voltou a ser opção para este sector [3].

Hoje em dia, o motor de indução encontra-se amplamente disseminado por todos os sectores de actividade. Os motores de indução com potências da ordem das dezenas de Watts até cerca de 50 MW são usados numa grande variedade de aplicações em edifícios, indústrias, ferramentas, serviços públicos e transporte onde a energia mecânica é obtida a partir da electricidade. De um modo geral podem-se encontrar motores de indução a accionar:

- Bombas para líquidos (água, óleo, fluidos de arrefecimento);
- Ventiladores para gases (ar, gás natural, vapor);
- Compressores para ar comprimido e para fluidos de sistemas AVAC;
- Sistemas de transporte, movimentação e processamento de materiais (transportadores, calandras, escadas rolantes, comboios, britadores, misturadores, etc.).

Os motores eléctricos, devido às suas características, substituíram os motores térmicos nas aplicações fixas. De facto, os motores eléctricos têm um tempo de vida útil muito superior aos motores térmicos e a sua manutenção é menor, pois possuem menos partes móveis sujeitas a desgastes. Não produzem emissões de gases para o ambiente do ponto de vista da utilização e tem rendimentos compreendidos entre 85 e 95%, enquanto que, os motores térmicos raramente ultrapassam os 40%.

Actualmente, no mundo, existem em funcionamento mais de 300 milhões de motores eléctricos de classe industrial, sendo vendidos anualmente mais de 30 milhões de novos motores (Austrália: 310 000 [2]; China: 5,66 milhões [7]; Europa EU-25: 10 milhões [8]; EUA: 1,8 milhão) e reparados mais de 90 milhões [9,10].

Na Europa, tal como em todo o mundo, o mercado de motores eléctricos é dominado pelos motores AC, em detrimento dos motores DC. Esta tendência deve-se ao facto dos motores de indução apresentarem um elevado desempenho dinâmico (quando alimentados por variadores electrónicos de velocidade), o seu custo ser mais baixo e exigirem menor manutenção. Tal com mostra a figura 2.3, os motores AC representam mais de 96% do mercado de motores.

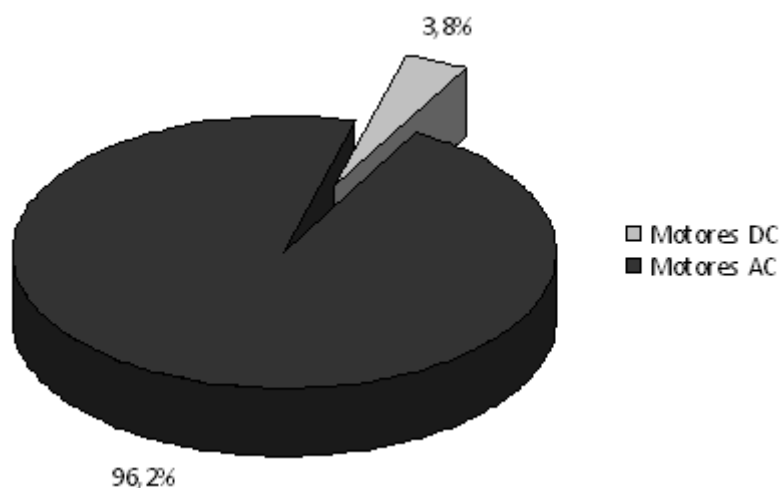


Figura 2.3 - Quota de mercado (unidades) por tipo de motor na Europa EU-25 (2006) [11]

Por sua vez, dentro do mercado de motores AC, destacam-se os motores de indução trifásicos e monofásicos que representam aproximadamente 90% do mercado na UE.

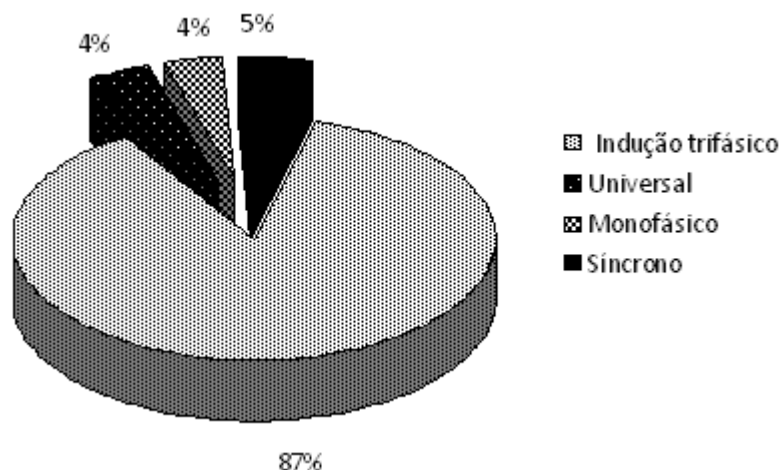


Figura 2.4 - Quota de vendas de motores AC na Europa EU-25¹ 2006 [11].

Do ponto de vista do tamanho dos motores, verifica-se que os motores de baixa potência representavam, em 2006, cerca de 80% do mercado de motores na EU-15².

Tabela 2.1 - Informação de Mercado EU-15 (2006) [11].

Gama de potência	Mercado EU-15 (Milhões de unidades)	Capacidade (GW)
0.75-7.5 kW	7.20	22.5
7.5-37 kW	1.50	30
37-75 kW	0.30	15.6
75-200 kW	0.10	11.6
Total	9.10	79.6

Relativamente ao tipo de motores, a tabela 2.2 mostra-nos que o mercado de motores de indução é dominado pelos motores de 2 e 4 pólos.

Tabela 2.2- Mercado EU-25 e EU-15 (2006) [11].

Tipo de motor	Quota (%)
2 Pólos	15-35
4 Pólos	50-70
6 Pólos	7-15
8 Pólos	1-7

¹ EU-25: Número de países membros da União Europeia depois da adesão do Chipre, República Checa, Estónia, Hungria, Letónia, Lituânia, Malta, Polónia, Eslováquia e Eslovénia.

² EU-15: de países membros da União Europeia antes da adesão dos dez países candidatos em 1 de Maio de 2004. Era composta pelos seguintes países: Áustria, Bélgica, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Holanda, Portugal, Espanha, Suécia, Reino Unido.

2.4-Consumo energético dos motores

Como já foi referido anteriormente, os motores são responsáveis pelo consumo de cerca de 40% da energia eléctrica produzida mundialmente (ver figura 2.5), ou seja, consomem anualmente 7400 TWh com uma carga de ponta entre 1600 e 2300 GW [9].

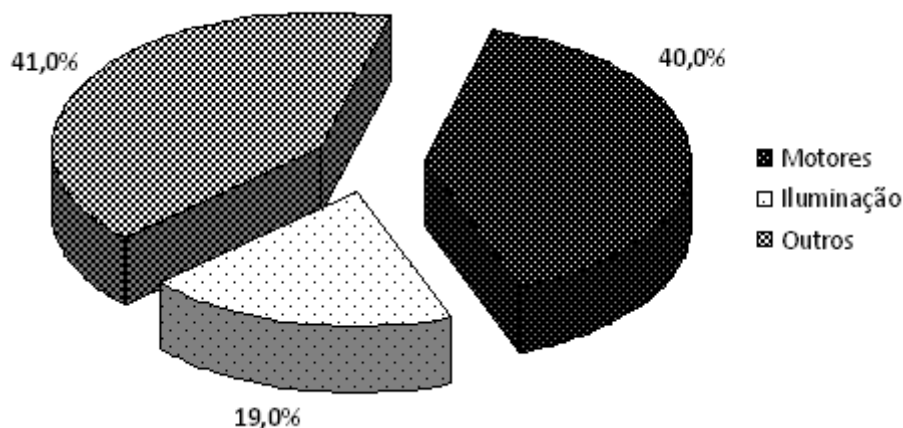


Figura 2.5: Consumo eléctrico no mundo [9].

Os motores e seus sistemas representam um potencial de eficiência energética de 20 a 30%, o que corresponde a uma poupança de energia de 1.500 a 2.200 TWh e uma redução de 900 a 1400 milhões de toneladas de CO₂ por ano [9].

Na UE, a energia eléctrica consumida pelos motores eléctricos na indústria representa entre 60 a 70% da energia eléctrica total consumida neste sector. O consumo anual total de electricidade da totalidade dos motores eléctricos atingiu 1 067 TWh em 2005, a que correspondem emissões de 427 milhões de toneladas de CO₂.

2.5-Procedimentos de ensaio para determinação da eficiência

Os procedimentos de ensaio para determinação da eficiência em motores eléctricos foram desde sempre um factor de divisão entre as principais associações de fabricantes de motores. O principal ponto de discórdia prendia-se com a avaliação das perdas adicionais em carga, e em certa medida, continua a ser um factor de grande discussão.

De um lado estavam a CSA (Canadian Standard Association) e o IEEE que defendem que as perdas adicionais devem ser medidas. Nos EUA e Canadá o método mais utilizado é sem dúvida o método B da norma IEEE-112. Este método consiste em três ensaios separados. São eles o ensaio de temperatura à carga nominal, ensaio em vazio para determinação das perdas mecânicas e no ferro e, por último, o ensaio de carga variável às condições nominais para determinação das perdas por efeito de Joule no estator e no rotor. As perdas adicionais são então obtidas através do método de separação de perdas, ou seja, através das perdas residuais por um método de extrapolação por regressão linear [12,13,15].

Nos países da Europa e no Reino Unido era seguida a norma internacional existente IEC 60034-2, no caso do reino Unido era seguida a norma BS 269, que apresentava duas categorias

Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Ehstar - análise crítica

de métodos para determinação da eficiência, método directo e métodos indirectos. O método mais usado era o método indirecto similar ao método E e F da norma IEEE-112 mas sendo as perdas adicionais em carga consideradas como sendo função do quadrado da corrente no estator e assumidas às condições estipuladas de carga iguais a 0,5% da potência de entrada do motor à plena carga e constante para toda a gama de potências [12,13,15].

No caso do Japão era seguida a norma JEC 37 que apresenta de uma forma geral os mesmos métodos que a norma IEEE-112 à excepção do método C. A diferença da norma Japonesa para com a norma Americana é que aquela considera as perdas adicionais como sendo nulas [12,13,15].

No início da década de 90 era este o panorama em termos de determinação de eficiência dos motores de indução. Estávamos perante um mercado de motores pouco transparente em termos de eficiência declarada pelos fabricantes. Para um mesmo motor, consoante o local do mundo onde fosse feito o ensaio, poderiam observar-se diferenças de eficiência que podiam chegar a ser da ordem de alguns pontos percentuais. Isto, como é óbvio, tornava o mercado muito pouco claro e transparente.

Devido à necessidade de tornar este sector mais transparente, a comunidade internacional começou a trabalhar no sentido de harmonizar os procedimentos de ensaio.

Em 2002, a IEC adoptou uma nova norma de ensaio (IEC 61972), que incluía um novo método de ensaio baseado nas potências de entrada/saída compatível com o método seguido nos EUA e Canadá. Esta norma incluía ainda um método baseado na alocação de perdas adicionais em carga que considerava como valor limite inferior 0,5% e superior 2,5% (ver figura 2.6). O CENELEC votou contra a aprovação desta norma e recusou a adopção da mesma alegando que esta iria provocar um aumento do custo de mão-de-obra sobretudo para ensaio de motores de grande porte. Estimou-se que o tempo de ensaio seria superior em 10 a 15%, do lado americano esta norma foi votada favoravelmente pois os laboratórios de ensaio dos fabricantes Americanos e Canadianos já possuíam as infra-estruturas necessárias à realização destes ensaios [9].

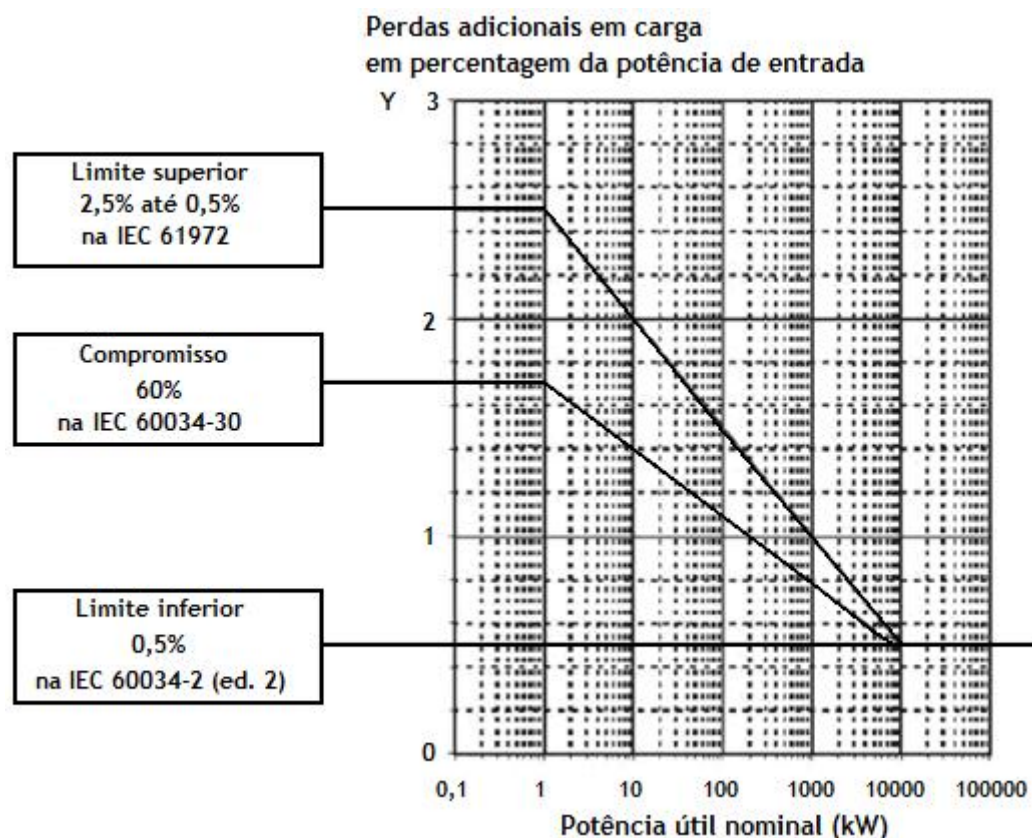


Figura 2.6- Valores padrão para as perdas adicionais em carga IEC 61972 [9]

Falhada esta tentativa de harmonizar os procedimentos de ensaio, começou-se a estudar alternativas que pudessem servir os interesses de todos os intervenientes. Em 2005 começaram os trabalhos para a elaboração de uma nova norma, a IEC 60034-2-1 (edição 4). O projecto desta norma contemplava a inclusão dos dois métodos propostos na IEC 61972, mas introduzia um terceiro método denominado método Eh-star. Este método visava a redução dos esforços de ensaio de que sofre o método B da IEEE e assim ficava resolvido o problema levantado pelo CENELEC [9].

Em 10 de Setembro de 2007 foi finalmente publicada a norma IEC 60034-2-1. Esta norma inclui três métodos para determinação das perdas adicionais em carga, incluindo o método B IEEE 112, classificados quanto ao grau de incerteza.

2.6-Requisitos de desempenho obrigatórios e voluntários

A introdução de normas de desempenho energético mínimo obrigatório (MEPS- mandatory Minimum Energy Performance Standards) é essencial para a evolução do mercado de motores de alta eficiência. A exigência de níveis mínimos de eficiência permite estimular a produção e venda de motores de alta eficiência, criando um comércio sustentável. A implementação de normas de desempenho energético mínimo, conjuntamente com regras de etiquetagem traduz-se num aumento do mercado de motores eficientes (figura 2.7).

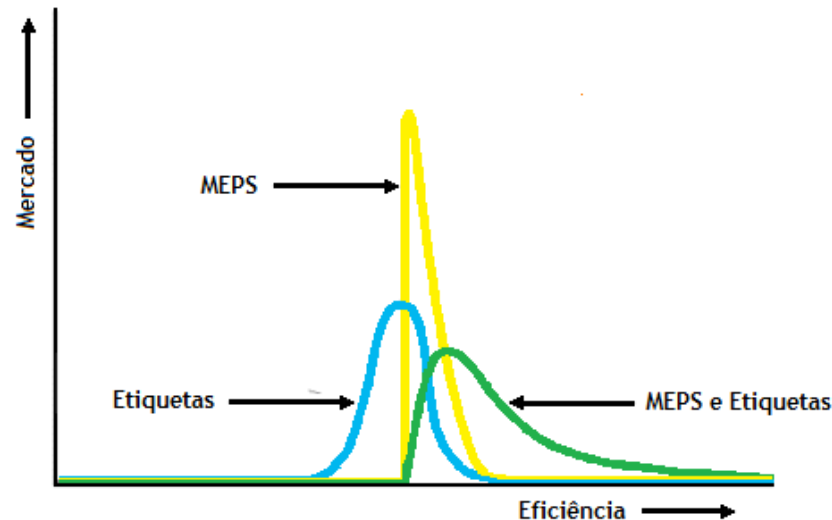


Figura 2.7 - Efeito dos MEPS obrigatórios e da etiquetagem/marcação da classe de rendimento no mercado dos motores eléctricos [17].

As normas de desempenho mínimo obrigatório (MEPS) surgiram em primeiro lugar nos Estados Unidos da América, em 1992, por iniciativa do congresso (*US Congress*) que aprovou o *Energy Policy Act* (EPAct) e tinha como objectivo definir normas de desempenho mínimo para os motores de indução importados e fabricados nos EUA. Pretendia-se que todos os motores comercializados em território Norte-Americano possuíssem eficiência energética mínima definida e que a mesma estivesse bem explícita na chapa de características do motor.

O mercado de vendas de motores com rendimentos iguais ou superiores aos mínimos obrigatórios era de apenas 20 % no ano de 1997, ano em que passou a ser obrigatório o cumprimento dessas mesmas normas. Oito anos depois, em 2005, o mercado de motores EPAct era já de 54% (ver figura 2.8) [17,18].

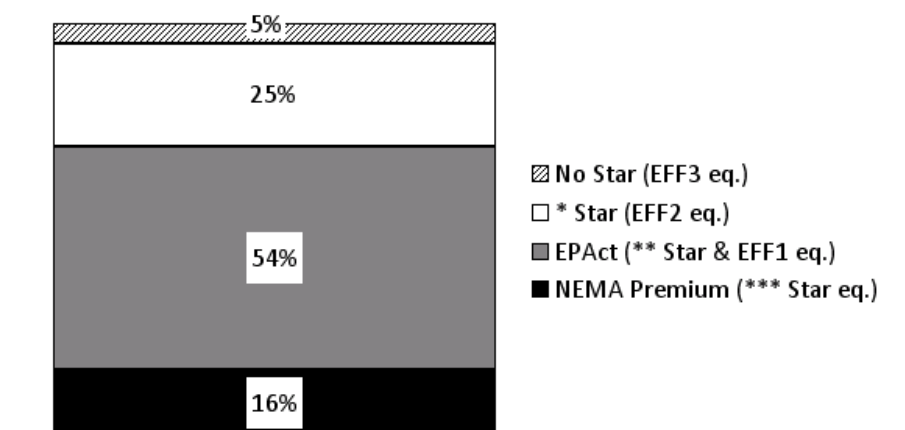


Figura 2.8- Mercado de motores de indução nos EUA em 2005 [17].

Posteriormente, como resultado da evolução natural do mercado, os fabricantes começaram a introduzir no mercado motores que superavam os níveis mínimos exigidos pelo EPAct, surgindo assim a necessidade de classificar estes novos motores. A Associação Americana de fabricantes de motores decidiu introduzir, em 2001, uma etiqueta especial designada “NEMA Premium”.

A aceitação no mercado destes motores de muito elevado rendimento foi moderada, particularmente por parte dos grandes consumidores. Todavia, as vendas dos motores de indução de classe NEMA Premium permanece estável desde há vários anos, com uma quota de mercado de aproximadamente 20%.

Como resultado da estagnação nas vendas destes motores de elevado rendimento, a NEMA e o ACEEE (*American Council for an Energy-Efficient Economy*) concordaram em propor um novo conjunto de normas relacionadas com rendimento energético dos motores eléctricos industriais. Assim, foi aprovada pelo congresso dos EUA, em Dezembro de 2007, a elevação dos níveis mínimos de rendimento definidos pelo EPAct para níveis NEMA Premium com obrigatoriedade a partir do ano de 2011. Foram também incluídos nesta norma os motores de potência entre 200 e 400 hp [17,18].

Na Europa, o primeiro passo para a introdução no mercado de motores mais eficientes foi dado em 1998 com o acordo voluntário do CEMEP/EU. Este foi assinado por 36 fabricantes de motores com a validade de cinco anos. Tinha o objectivo de classificar os seus motores padrão, de lançar e promover a utilização de motores mais eficientes, reduzindo em 50% a penetração no mercado de motores EFF3 no seu conjunto das vendas.

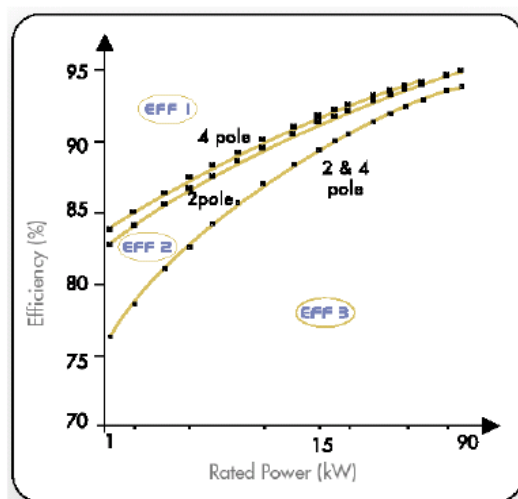


Figura 2.9 - Classes de eficiência dos acordos CEMEP/EU [11].

Os objectivos a que se propuseram foram atingidos plenamente, de tal forma que, a percentagem de motores EFF3 diminuiu de 68% em 1998 para 8% em 2004. A venda de motores com melhor eficiência (classe EFF1 e EFF2) aumentou para quase 90 por cento no final de 2003. A figura 2.10 mostra a evolução dos motores de 2 e 4 pólos no mercado europeu desde 1998 até 2006.

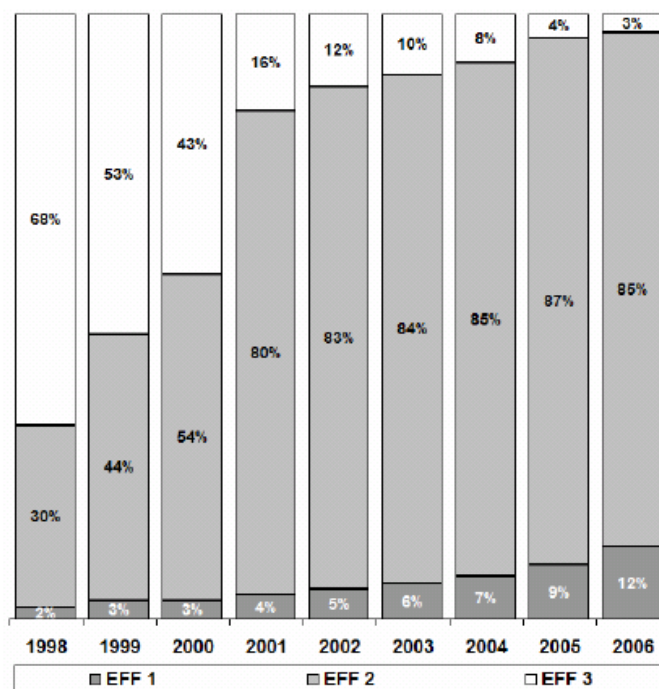


Figura 2.10 Total das vendas de motores de indução por parte dos membros da CEMEP, no período entre 1998 e 2006 (Fonte: CEMEP, 2008) [17].

Apesar do bom funcionamento deste acordo, verificou-se que os motores de classe EFF1 tiveram uma baixa penetração no mercado comparativamente com os motores de classe EFF2. A maior penetração no mercado dos motores EFF2 foi atingida devido a um grande esforço dos fabricantes de motores. Os fabricantes apontam como razão para a baixa penetração no mercado de motores EFF1 o seu preço, que é em comparação com um motor EFF2 cerca de 20% - 30% superior. A razão para o preço mais elevado é o resultado de maiores necessidades de aço, cobre e, ainda, materiais de alta qualidade [11].

Os países que têm implementadas normas de desempenho energético mínimo obrigatórias em níveis eficiência relativamente elevados, como o Canadá e os Estados Unidos, têm quotas de mercado dos motores de alta eficiência bastante elevadas sendo neste dois países de 70%, enquanto que a quota de mercado noutros países, tais como os países europeus, para abaixo de 10%, apesar de programas voluntários.

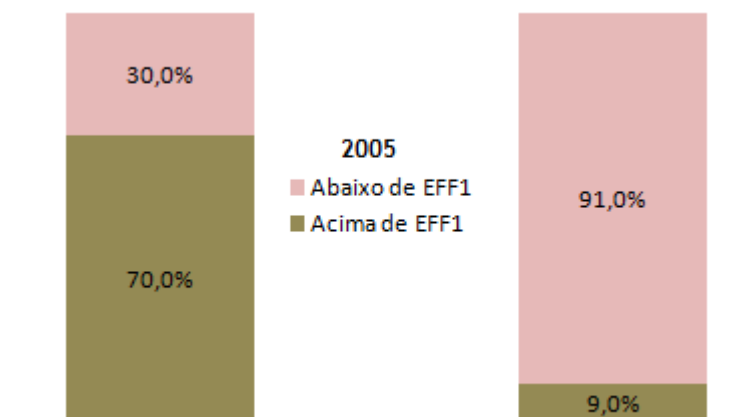


Figura 2.11 - Comparação do mercado de motores de alta eficiência entre EUA e EU em 2005 [17].

Na tabela 2.3 é apresentada uma panorâmica mundial dos acordos obrigatórios e voluntários.

Tabela 2.3 - Regulamentação e acordos voluntários sobre eficiência em motores de indução [17].

País / região	Acordos obrigatórios (ano de implementação)	Acordos voluntários (ano de implementação)	Quota de mercado
E.U.A.	EPAct - Alta Eficiência (1997) NEMA Premium (2011)	NEMA Premium (2001)	NEMA Premium (16%) EPAct(54%)
Canadá	Níveis EPAct - Alta Eficiência (1997)	NEMA Premium (2001)	NEMA Premium (16%) EPAct (54%)
México	Níveis EPAct - Alta Eficiência (1998)	NEMA Premium (2003)	-
EU	-	Classificação de eficiência e redução de Mercado de motores EFF3 (1998)	EFF1 (12%) EFF2 (85%) para membros CEMEP
Austrália	Alta Eficiência (2006)	Eficiência Premium (2006)	Eficiência Premium (10%) Alta Eficiência (32%) Eficiência Standard (58%)
Nova Zelândia	Alta Eficiência (2006)	Eficiência Premium (2006)	-
Brasil	Eficiência Standard (2002) Alta Eficiência (2009)	Alta Eficiência	Alta Eficiência (15%)
China	Eficiência Standard (2002) Alta Eficiência (2011)	Eficiência Premium (2007)	Alta Eficiência (10%) Eficiência Standard (90%)
Coreia	Eficiência Standard (2008)	Eficiência Standard (1996)	Alta Eficiência (10%) Eficiência Standard (90%)

2.7-Classes de eficiência, sistemas de marcação e etiquetagem

Actualmente, existem várias normas relacionadas com as classes e métodos de medida do rendimento dos motores de indução (NEMA e EPAct nos EUA, CSA no Canadá, CEMEP/EU na Europa, AS/NZ na Austrália e Nova Zelândia, JIS no Japão e GB na China) estando em estudo novas classes de rendimento em diferentes zonas do globo.

Esta variedade de normas traz dificuldades para os fabricantes projectar e vender motores num mercado global. Por outro lado, os consumidores finais sentem cada vez mais dificuldade em entender as diferenças e similitudes das normas utilizadas em diferentes países.

A primeira edição da nova IEC 60034-30, referente às classes de eficiência foi publicada em 22 de Outubro de 2008. Esta norma abrange os motores de indução com potência entre 0.75 a 370 kW alimentados directamente da rede a duas ou mais tensões e/ou frequências. Nesta norma estão contempladas quatro classes de rendimento designadas por duas letras “IE”, que provém de International Energy Efficiency Class, seguidas por um algarismo correspondente à classe. A norma contempla então as classes de Rendimento Standard (IE1), Rendimento Elevado (IE2), Rendimento Premium (IE3) e Rendimento Super Premium (IE4).

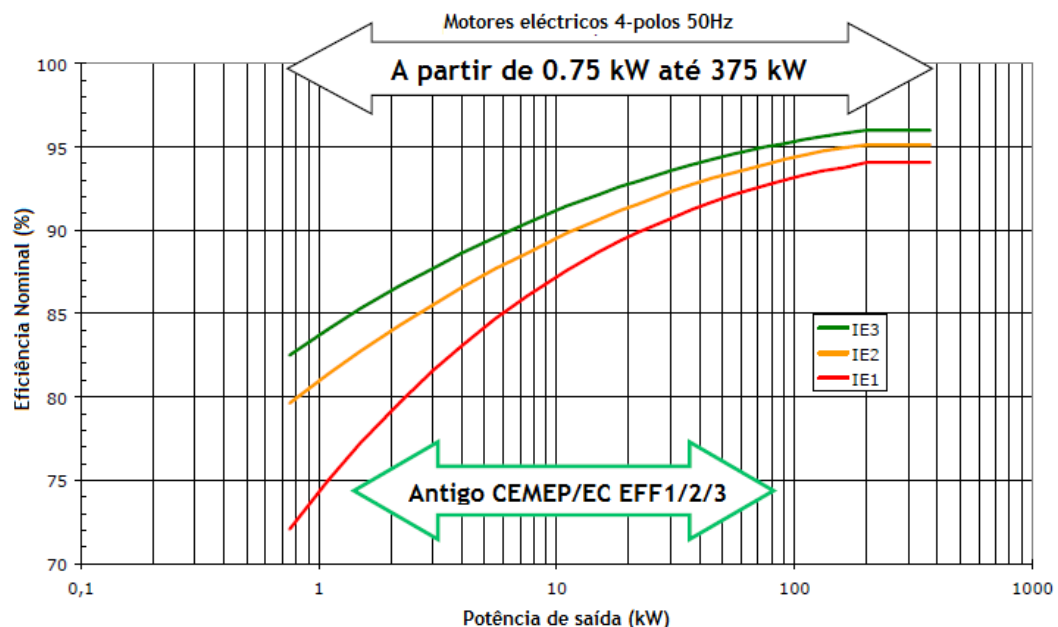


Figura 2.12- Classes Eficiência Energética IEC 60034-30 [9].

O valor nominal e a classe do rendimento devem ser devidamente marcados na chapa de características. Os motores de indução com um rendimento nominal abaixo do limite inferior da classe IE1 são considerados de baixo rendimento ($<IE1$). Os motores de indução com um rendimento nominal igual ou superior ao limite inferior de uma classe de rendimento são classificados como pertencendo a essa classe de rendimento.

A classe de rendimento IE4 encontra-se na norma num sentido informativo uma vez que ainda não há suficiente mercado e experiência para a normalização desta classe.

Espera-se que os avanços tecnológicos permitam aos fabricantes projectar motores para esta classe de rendimento com dimensões mecânicas (e.g., altura do veio) compatíveis com aquelas dos motores de classe inferior (conforme se define nas normas EN 50347 e NEMA MG1) [13].

Para a aplicação da norma IEC 60034-30, o rendimento dos motores de indução deverá ser medido através de um método de baixa incerteza (*low uncertainty method*), de acordo com a norma IEC 60034-2-1.

Capítulo 3

Perdas adicionais em máquinas de indução

3.1-Introdução

As perdas adicionais em carga são, em geral, definidas na norma IEC60034-2-1 como “perdas produzidas pela corrente de carga nas partes activas do ferro e outras partes metálicas à excepção dos condutores dos enrolamentos; perdas por correntes de Foucault nos condutores dos enrolamentos causadas por pulsações do fluxo dependente da corrente de carga e perdas adicionais nas escovas causadas pelas comutações”.

A diferença entre as perdas reais e as calculadas foram inicialmente designadas por *stray-load losses* no início de 1960. Christophides foi um dos primeiros autores a quantificar a diferença entre a potência de perdas reais, medida através de experimentação, e as perdas determinadas através do método de separação de perdas [20].

Christofides [22] define as perdas adicionais em carga da seguinte forma: “ as perdas adicionais em carga de um motor de indução são definidas como a diferença entre a potência total perdas da máquina em carga e as perdas determinadas pelo método de separação de perdas. As perdas separadas são:

- i) Perdas por atrito e ventilação p_{fw} e perdas no núcleo do estator p_{Fe} deduzidas a partir do ensaio em vazio;
- ii) Perdas por efeito de Joule no estator p_s ;
- iii) Perdas nos condutores do rotor $p_r = s \cdot (P_{el} - p_s - p_{Fe})$, onde s é o deslizamento a um dado regime de carga e P_{el} é a potência de entrada do estator.”

Alger [19] define as perdas adicionais em carga como sendo o excesso das perdas totais que realmente ocorrem num motor a uma determinada carga sobre as perdas calculadas (perdas no cobre, perdas no ferro e perdas por atrito e ventilação).

Alguns autores deram a definição a partir de aspectos particulares do tema. Por exemplo, a definição de Morgan reflecte os aspectos de medição; para Schwartz a definição é dada em função da origem dessas perdas; Odok e Cristofides dão definições do ponto de vista do cálculo ou previsão [20].

3.2-Origem das perdas

As origens físicas das perdas adicionais em carga nos motores de indução são consensuais. As perdas adicionais em carga ocorrem devido:

- Às propriedades magnéticas do ferro que levam à sua saturação, limitando a carga.
- À estrutura geométrica, (isto é ranhuras, enrolamentos, entreferro) em torno da região activa da máquina que provoca harmónicos de ranhura devido a efeitos como a pulsação do fluxo na região dos dentes e acréscimo dos fluxos de fugas.
- Às Imperfeições industriais, a mais importante das quais é a circulação de correntes inter-barras devido à inexistência/imperfeição do isolamento das barras da gaiola de esquilo do rotor [19, 20].

3.3-Componentes das perdas

Para Jimoh [20] as componentes das perdas adicionais em carga estão razoavelmente bem estabelecidas. No entanto, a forma com são apresentadas são muitas vezes confusas o que pode dar origem a diferentes interpretações sobre as implicações das mesmas. O autor sugere três razões para este facto:

- i) A confusão resultante da utilização de termos como “fluxo de fugas” e “harmónicos”.
- ii) A confusão que surge com a utilização dos termos “fluxo de fugas diferenciais”, “fluxo de fugas em ziguezague, fluxo de fugas de enlace (“phase belt flux”)", e “fluxo de fugas no entreferro” apesar de serem a mesma coisa.
- iii) A dificuldade em identificar fisicamente as várias componentes (fluxo de fugas diferenciais, fluxo de fugas em ziguezague, fluxo de fugas de enlace e fluxo de fugas no entreferro).

Por outro lado, Alger [19] divide as perdas adicionais em seis componentes principais. São elas(ver figura 3.1):

- i) Perdas por efeito pelicular nos condutores do estator devido ao fluxo de fugas de ranhura (“*slot leakage flux*”, na literatura inglesa).
- ii) Perdas devido ao fluxo de fugas de extremidade(“*end leakage flux*”).
- iii) Perdas de alta-frequência nos dentes do estator e na superfície do rotor devido ao fluxo de fugas em ziguezague “*zigzag leakage flux*”.
- iv) Perdas de alta-frequência, por efeito de Joule no rotor, devido também ao fluxo de fugas em ziguezague.
- v) Perdas por efeito de Joule no rotor de frequência de sexta ordem devido à circulação de correntes induzidas pelo fluxo de fugas de enlace do estator “*stator belt leakage flux*”.
- vi) Perdas no ferro, em motores com ranhuras inclinadas, devido ao fluxo de fugas de inclinação (“*skew leakage flux*”).

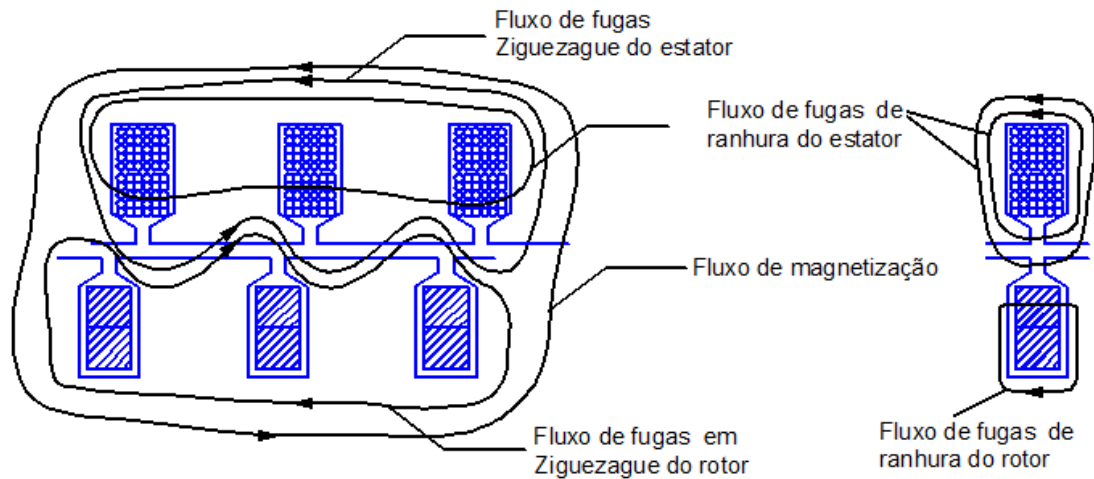


Figura 3.1 - Linhas de campo do fluxo de fugas no rotor e estator.

Finalmente, Jimoh [20] apresenta também as versões de Chalmers e Williamson sobre as componentes de perdas adicionais em carga. Para estes autores, as perdas adicionais podem ser subdivididas em componentes à frequência fundamental e componentes de alta-frequência, isto é:

Componentes à frequência fundamental:

- Perdas por efeito pelicular nos condutores do estator devido ao fluxo de fugas de ranhuras.
- Perdas nas testas das bobinas, aço e outras partes metálicas, devido ao fluxo de fugas das extremidades.
- Em máquinas com as ranhuras do rotor inclinadas, ocorrem pequenas perdas nas extremidades do núcleo do estator devido a fugas de fluxo por distorção provocada pelo deslocamento de fase das ondas fundamentais das forças magnetomotrizes do estator e do rotor.

Componentes de alta-frequência:

- Perdas no rotor devidas à indução provocada pela distorção harmónica da força magnetomotriz produzida pela corrente de carga no estator. Note-se que estas pulsações no fluxo fundamental, devido às aberturas das ranhuras, são produzidas em vazio e o seu efeito está incluído nas perdas no ferro determinadas no ensaio em vazio.
- Perdas no estator devidas à indução mútua provocada pela distorção harmónica da força magnetomotriz do rotor.

3.3.1- Conclusão

Apesar das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos estarem razoavelmente bem caracterizadas por vários autores há relativamente muito tempo, só agora surgiu, através da publicação da norma IEC 60034-2-1 por parte de um organismo internacional de normalização conceituado, um método de ensaio específico para

determinação laboratorial desta parcela de perdas, ainda que através de um método indirecto.

3.4-Efeitos das perdas adicionais em carga

As perdas adicionais em carga têm cinco efeitos prejudiciais no desempenho das máquinas de indução:

- i) Aquecimento;
- ii) Perdas de binário;
- iii) Nos tempos de aceleração e de desaceleração;
- iv) Eficiência;
- v) Características nominais.

3.4.1-Aquecimento

As perdas adicionais em carga contribuem para o incremento de aquecimento nos vários componentes da máquina.

3.4.2-Perdas de binário

São produzidos binários assíncronos devido à distorção harmónica da força magnetomotriz do estator. Estes binários parasitas, como mostra a curva binário-velocidade da figura 3.2, afectam o desempenho da máquina.

Barton e Ahmad observaram que para máquinas de indução pequenas e médias, as perdas adicionais afectam muito o binário útil, mas não afectam significativamente o binário de arranque. Alguns investigadores, observando a relação entre binários parasitas e as perdas adicionais em carga, consideraram a análise do binário o meio mais apropriado através do qual elas poderiam ser estudadas e melhor compreendidas [20].

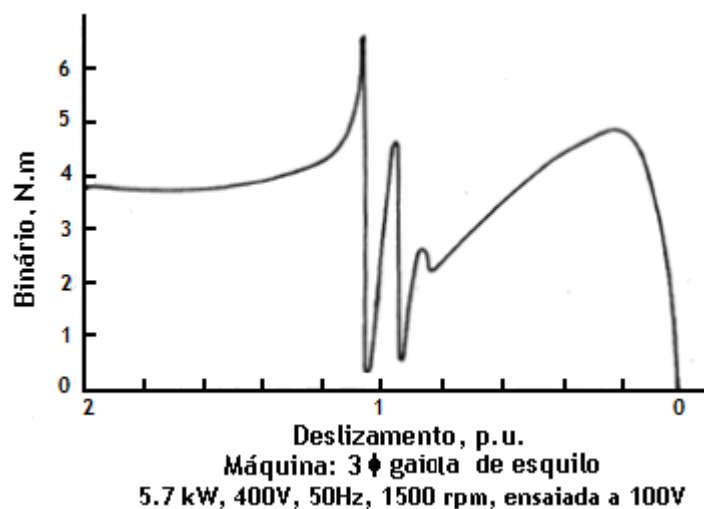


Figura 3.2 - Característica binário-velocidade de uma máquina de indução [16].

3.4.3-Aceleração e desaceleração

Em certas aplicações, tal como no accionamento de unidades de centrifugação, onde a principal dificuldade é o arranque e a paragem da carga, devido à sua alta inércia, as perdas adicionais vão aumentar o tempo de aceleração e diminuir o tempo de desaceleração. Barton e Ahmed efectuaram alguns trabalhos experimentais para apoiar esta tese [20].

3.4.4-Eficiência

No método de "imputação prévia" de perdas (adicionais em carga) da norma IEC 60034-2-1 assume-se um valor de perdas adicionais em carga como estando no intervalo 0,5% a 2,5% da potência nominal. De facto, experiências descritas na literatura parecem confirmar que este intervalo se adequa melhor à realidade, apesar de em alguns casos as perdas adicionais poderem ser muito superiores a este valor. Na tabela 3.1 pode observar-se o resultado de algumas experiências realizadas por investigadores de várias nacionalidades.

Tabela 3.1 - Resultados de algumas experiências de vários autores [24].

Autor	Nº de máquinas ensaiadas	Resultado
Alger e outros	68 Máquinas	1,00% até 1,46%
Schwarz	5 Máquinas	1,55% até 1,90%
Bird	2 Máquinas	1,30% até 2,30%
Pasdeloup	Gama	Média de 1,45%
Simon e outros	Gama	0,9% a 1,8%
Ho e Fu	1 Máquina	2,75%
Bousbaine	1 Máquina	0,93%
Taegan e outros	Gama	1,15% até 3,89% (rotor com ranhuras não enviesadas)
		2,87% até 12,9% (rotor com ranhuras enviesadas)

3.4.5-Características nominais

A alteração das características nominais é a consequência prática dos efeitos anteriores. Se as perdas adicionais em carga de um motor forem superiores às previstas, o aquecimento nominal poderá ser superior às tolerâncias de fabrico. Assim, para evitar a destruição ou degradação dos materiais, alguns parâmetros nominais têm de ser reduzidos, como por exemplo o deslizamento e a potência útil.

3.5-Métodos actuais para determinação das perdas adicionais em carga

Vários métodos têm sido sugeridos para determinar as perdas adicionais em carga nas máquinas de indução. Por uma razão ou por outra, nenhum destes métodos gerou ainda consenso a nível mundial.

3.5.1-Métodos directos

Os métodos directos para determinação das perdas adicionais em carga consistem, de uma forma geral, na determinação da parcela total de perdas à qual são subtraídas as parcelas de perdas por efeito de Joule, perdas mecânicas e perdas magnéticas. Dentro deste tipo, os métodos actualmente aceites pela norma IEC 60034-2-1 são o método de medida de binário (entrada-saída), o método de ensaio em oposição com dupla alimentação (back-to-back) e o método calorimétrico.

3.5.1.1-Método entrada-saída

Este método, constante da norma IEEE112, consiste na obtenção das perdas totais através da medição directa da potência útil do motor (P_{mec}), através de um dinamómetro, e da potência eléctrica absorvida pelo mesmo (P_{el}).

As perdas totais são então obtidas através da expressão:

$$P_t = P_{el} - P_{mec} \quad (1)$$

Para obter as perdas adicionais em carga é necessário obter as restantes parcelas de perdas através do método de separação de perdas. As perdas no ferro (p_{Fe}) e as perdas por atrito e ventilação p_{fw} são determinadas através do ensaio em vazio a tensão variável. As perdas no cobre do estator (p_s) e do rotor (p_r) são determinadas a partir do ensaio em carga. Obtém-se assim:

$$P_{seg} = P_s + P_r + P_{fw} + P_{Fe} \quad (2)$$

Finalmente, as perdas adicionais em carga são determinadas através da expressão:

$$P_{ad} = P_t - P_{seg} \quad (3)$$

No entanto, este método é de difícil aplicabilidade, para máquinas de pequeno porte, devido ao facto de este requerer a subtracção de dois valores muito próximos (p_t e p_{seg}) para obter um valor relativamente pequeno de perdas adicionais. Assim, é necessário um elevado grau de precisão, pois um pequeno erro naquelas quantidades pode significar um erro muito elevado no resultado final. Por exemplo [20], para uma máquina com uma eficiência de 90%, um erro de precisão de 1% nas medições irá produzir um erro de cerca de 100% na determinação do valor das respectivas perdas adicionais em carga. No caso de máquinas de grande porte é de difícil implementação, pois exige condições de carga e instrumentação muito específicas.

3.5.1.2-Método Pump-back

Este método, constante da norma IEEE112, é similar ao anterior excepto que a potência de saída é medida electricamente através do acoplamento de uma máquina idêntica, a qual é usada como gerador. São feitas as leituras da potência, tensão e corrente nos dois terminais das máquinas, entrada e saída, e é registado o valor do deslizamento e da temperatura dos enrolamentos nas duas máquinas. A partir destas leituras, são obtidas as perdas por efeito de Joule e as perdas em vazio.

As perdas adicionais em carga do conjunto das duas máquinas são então obtidas subtraindo as perdas obtidas por separação e as perdas totais.

Para além deste método apresentar as mesmas desvantagens do método anterior, acresce ainda o facto de as perdas adicionais em carga da máquina em estudo ser o resultado da divisão em partes iguais das perdas obtidas. Isto representa uma desvantagem visto que, em primeiro lugar, é quase impossível obter duas máquinas absolutamente idênticas, quer no aspecto mecânico quer a nível eléctrico e, em segundo lugar, mesmo com duas máquinas absolutamente idênticas, não é provável que as perdas adicionais em carga sejam iguais sob as condições de funcionamento a que as medições são efectuadas.

3.5.1.3-Método calorimétrico

O método calorimétrico consiste na medição da quantidade de calor que é libertado pela máquina através do fluído de arrefecimento, normalmente o ar. Este método só pode ser aplicado praticamente em grandes máquinas e naquelas em que o fluído de arrefecimento é forçado a passar através de passagens específicas.

Este método apresenta problemas de medição que resultam numa baixa precisão, uma vez que o procedimento a usar deve ser similar ao usado no método anterior.

3.5.2-Métodos indirectos

Os métodos indirectos, para determinação das perdas adicionais em carga, consistem na determinação da parcela de perdas adicionais em carga através de meios analíticos. Os métodos mais populares são: o método em oposição, o método de curto-circuito, o método de rotação inversa e o método Eh-star.

3.5.2.1-Método em oposição (back-to-back)

Este método, constante da norma IEC 60034-2-1, consiste no acoplamento de duas máquinas de indução a um dinamómetro respectivamente. Esses mesmos dinamómetros são fixos a uma plataforma estável e os veios das máquinas são acoplados um ao outro. Uma das máquinas de indução funciona como motor e roda a uma velocidade n_m (rpm), isto é $n_g > n_{sync} > n_m$. As duas velocidades n_m e n_g podem ser ajustadas até as duas carcaças do estator tenderem a parar, o que significa que os binários nos dois acoplamentos são iguais. Se neste ponto de equilíbrio, a soma das potências eléctricas estatóricas nas duas máquinas é P_{ac} , as perdas eléctricas totais p_t , de ambas as máquinas, são dadas pela expressão:

$$p_t = p_{ac} + 2\pi \cdot (n_g - n_m) \cdot T \quad (4)$$

As perdas adicionais em carga P_{ad} são aproximadamente:

$$P_{ad} = P_{ac} - (P_{Fe} - P_s) \quad (5)$$

Onde

P_{Fe} e P_s são, respectivamente, as perdas no ferro e no cobre do estator respectivamente.

As perdas adicionais obtidas por este método são aproximadas, porque o método assume que a componente de perdas em carga $2\pi(n_g - n_m)T$ é igual às perdas no cobre do rotor nas duas máquinas. Também o facto das perdas adicionais obtidas terem de ser repartidas igualmente entre as duas máquinas, não perfeitamente idênticas e a funcionar em diferentes modos, é questionável. Além disso, a configuração de ensaio pode não ser exequível para grandes máquinas.

3.5.2.2-Método de curto-circuito AC/DC

Este método consiste em três ensaios separados:

- i) Ensaio com rotor removido;
- ii) Ensaio em curto-circuito DC ou síncrono;
- iii) Ensaio em curto-circuito AC ou assíncrono.

Ensaio de rotor removido:

As perdas adicionais no estator são medidas com o rotor removido, aplicando uma corrente equilibrada polifásica aos terminais dos enrolamentos do estator. O valor da potência de entrada, menos as perdas por efeito de Joule, é considerado como sendo o valor das perdas adicionais no estator à frequência fundamental, $P_{ad,ff}$.

Estas perdas são medidas por uma corrente de teste dada por:

$$I = \sqrt{(I_1^2 - I_m^2)} \quad (6)$$

onde I_1 é a corrente de carga no estator e I_m é a corrente de magnetização.

Ensaio em curto-circuito DC:

Este ensaio, sugerido por Koch [20], consiste em fazer passar uma corrente contínua no enrolamento do estator do motor de indução, enquanto o seu rotor roda à velocidade de sincronismo. O incremento de potência requerido na potência mecânica para fazer rodar o rotor nestas circunstâncias é medido e é denominado perdas rotacionais, P_{rot} . A parcela de perdas rotacionais contém as perdas à frequência fundamental no rotor, mais as perdas de alta-frequência causadas pela rotação do mesmo.

A intensidade da corrente deve ser escolhida de modo a corresponder ao valor de pico da corrente de carga do motor.

Ensaio em curto-circuito AC:

Este ensaio é basicamente o ensaio com rotor bloqueado. A potência de entrada (requerida à rede), $P_{r,ff}$, é considerada como sendo as perdas no rotor à frequência fundamental.

Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Eh-star - análise crítica

As perdas adicionais obtêm-se então pela expressão:

$$P_{ad} = P_{ad,ff} + P_{rot} - P_{r,ff} \quad (7)$$

3.5.2.3-Método de rotação inversa

Este método, constante da norma IEC 60034-2-1, consiste em dois ensaios separados:

- i) Ensaio com rotor removido;
- ii) Ensaio de rotação inversa.

Ensaio de rotor removido:

Idêntico ao ensaio já descrito no ponto 3.5.2.2

Ensaio de rotação inversa:

São aplicadas tensões polifásicas ao estator da máquina, e o rotor é posto a rodar à velocidade síncrona mas em sentido oposto ao da rotação da f.m.m. estatórica. A potência de entrada do estator, P_{el} , e a potência no veio, P_{mec} , são medidas por uma corrente igual à definida pela anterior equação (6).

Com o estator desligado, a potência mecânica, P_{fw} , requerida para fazer rodar o rotor à velocidade de sincronismo na mesma direcção, é medida.

As perdas adicionais em carga podem então ser obtidas através da equação:

$$P_{ad} = (P_{mec} - P_{fw}) - (P_{el} - P_s - 2 \cdot P_{ad,ff}) \quad (8)$$

3.5.2.4-Método Eh-star

O método Eh-star, constante da norma IEC 60034-2-1, consiste na alimentação assimétrica de uma máquina de indução trifásica, através da introdução de uma resistência R_{eh} entre duas fases da máquina. Este método será descrito em detalhe no capítulo seguinte.

Capítulo 4

Método Eh-star

4.1-Introdução

O circuito Eh-star foi proposto em 1967, por Heinz Jordan e outros da universidade de Hannover, Alemanha, para dar conta das até então subestimadas perdas adicionais em carga [8].

O termo “Eh-star” deriva do termo alemão “Einphasing mit Hilfswiderstand” que significa monofásico com resistência auxiliar mais o sufixo star de ligação em estrela [25,28]. Este método manteve-se esquecido devido à elevada computação necessária para processar os dados do ensaio estando hoje descrito na norma EIC 60034-2-1.

O circuito Eh-star consiste na alimentação assimétrica de uma máquina de indução trifásica (gaiola esquilho ou rotor bobinado). Duas fases, U e W, da máquina são ligadas em paralelo através de uma resistência ôhmica R_{eh} de valor semelhante à impedância de curto-circuito da máquina a ensaiar (figura 4.1) [25, 26,28,29].

Em termos de princípio, este método é idêntico ao método de rotação inversa, mas não exige o acoplamento a outra máquina e não é necessário qualquer dinamómetro [27].

O arranque do motor é efectuado em regime trifásico simétrico e equilibrado sendo feita a comutação para regime assimétrico através do interruptor S.

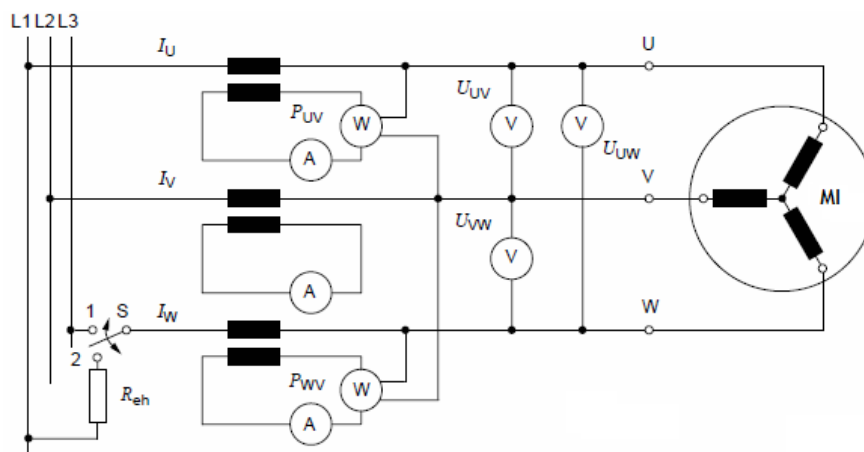


Figura 4.1 - Circuito de ensaio Eh-star [25].

4.1.1-Funcionamento assimétrico

Quando se dá a comutação do interruptor S, o motor fica ligado a duas fases do sistema trifásico, por intermédio da resistência R_{eh} (figura 4.2). A função desta resistência é provocar o surgimento de tensões desequilibradas nos terminais dos enrolamentos do estator do motor.

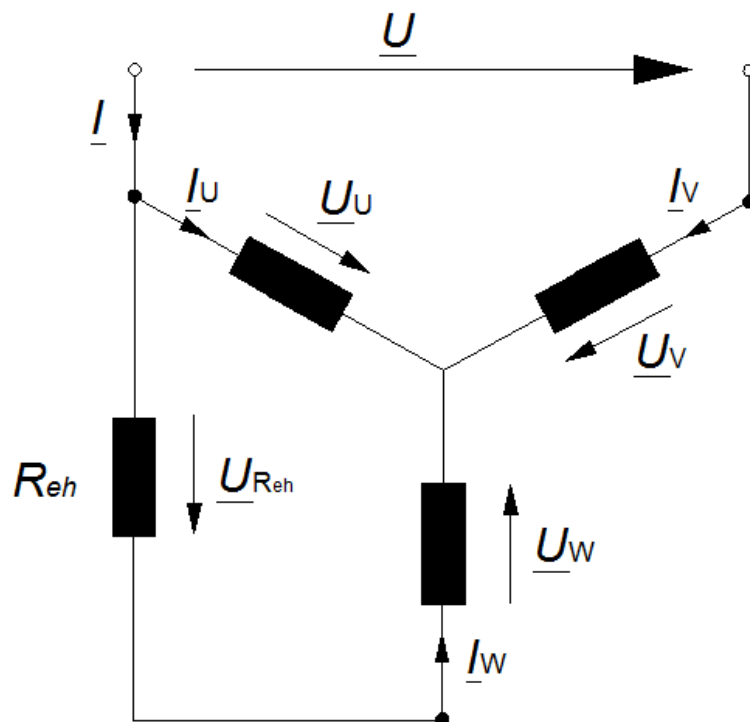


Figura 4.2 - Circuito assimétrico equivalente.

Nestas condições, máquina pode ser considerada, segundo as regras das componentes simétricas, como a sobreposição de duas máquinas de indução equivalentes (figura 4.3), uma das quais é alimentada pelo sistema de sequência positiva, com um deslizamento $s_1=s$ e, a outra, pelo sistema de sequência negativa, com um deslizamento $s_2=2-s$.

A corrente de sequência positiva gera, no motor, um binário com deslizamento próximo do deslizamento da máquina em vazio. Por sua vez, a corrente de sequência negativa gera um binário com deslizamento próximo de dois, estando a máquina a funcionar como freio, simulando assim condições de carga.

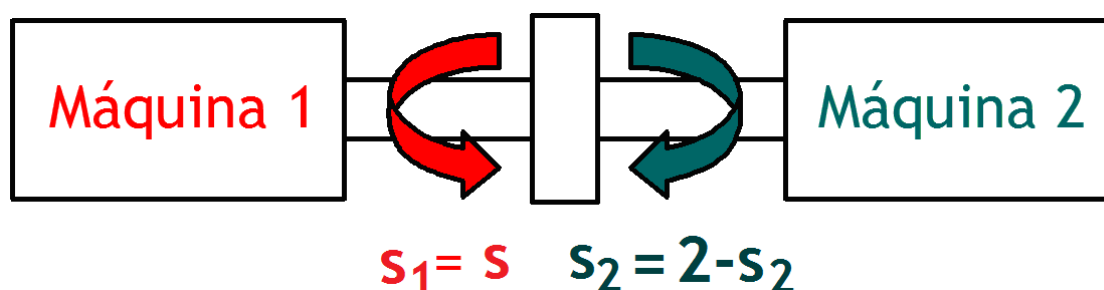


Figura 4.3 - Máquinas equivalentes simulando o ensaio Eh-star.

Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Eh-star - análise crítica

A componente homopolar não vai existir, pois uma das condições do ensaio é a ligação dos enrolamentos do estator em estrela com o neutro isolado da rede. Assim, a circulação de corrente homopolar não tem caminho de retorno à fonte.

4.2-Requisitos de ensaio

Para a realização deste ensaio é necessário que os enrolamentos do estator do motor a ensaiar sejam ligados em estrela. Os motores que possuem enrolamentos do estator com ligação em triângulo devem ser reconfigurados para estrela. O ponto neutro não deve ser ligado de forma a evitar a circulação de correntes homopolares.

Os valores da tensão e corrente de teste devem ser calculados consoante a ligação dos enrolamentos do motor a ensaiar:

Tabela 4.1 - Tensão e corrente de teste.

Ligação dos enrolamentos em estrela	Ligação dos enrolamentos em triângulo
$U_t = U_N ; I_t = \sqrt{I_N^2 - I_0^2}$	$U_t = U_N \times \sqrt{3} ; I_t = \frac{\sqrt{I_N^2 - I_0^2}}{\sqrt{3}}$

em que:

U_t é a tensão de teste, em Volts;

I_t é a corrente de teste, em Amperes;

U_N é a tensão estipulada, em Volts;

I_N é a corrente estipulada, em Amperes;

I_0 é a corrente em vazio, em Amperes.

A fase W do motor deve ser ligada à alimentação por intermédio de uma resistência R'_{eh} (ver figura 4.1), com os seguintes valores típicos aproximados:

Tabela 4.2 - Valores típicos de R'_{eh} .

Ligação dos enrolamentos em estrela	Ligação dos enrolamentos em triângulo
$R'_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \cdot 0,2$	$R'_{eh} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{I_N} \cdot 0,2$

A resistência R_{eh} , utilizada durante o ensaio, deve ser ajustada para que a corrente $I_{(1)}$ de sequência positiva fique abaixo de 30% da corrente $I_{(2)}$ sequência negativa. É recomendado que se comece o ensaio com um valor real de resistência R_{eh} que não difira mais de 20% do valor típico R'_{eh} .

O deslizamento não deve ser superior a duas vezes o deslizamento nominal para todos os pontos de ensaio, ou seja:

$$n \geq n_s - 2 \cdot (n_s - n_N) \quad (9)$$

Se esta condição não for verificada o ensaio deve ser repetido aumentando o valor de R_{eh} . Se, mesmo assim, o motor continuar com um funcionamento instável para correntes abaixo da corrente nominal por fase, esses pontos de ensaio devem ser omitidos.

O arranque de grandes motores só pode ser efectuado sem a resistência R_{eh} (comutador S na posição 1, ver figura 4.1) a tensão reduzida (25% - 40% U_N). Para motores pequenos, o arranque poderá efectuar-se com a resistência R_{eh} ligada não sendo necessário o comutador S.

4.2.1-Condições eléctricas de operação durante o ensaio Eh-star

4.2.1.1-Forma e simetria das tensões

Para motores AC, classificados para utilização com fonte de alimentação de frequência fixa, alimentados a partir de um gerador AC (local ou através de uma rede de abastecimento), o factor de distorção harmónica da tensão (HVF) não deve exceder:

- 0,02 para motores monofásicos e trifásicos, incluindo motores síncronos, mas excluindo os motores de tipo N, a menos que o fabricante declare o contrário.
- 0,03 para motores de tipo N.

A este propósito, realça-se que os motores AC trifásicos devem estar preparados para operarem sob um sistema trifásico de tensão com uma componente de sequência negativa que não ultrapasse 1% da componente de sequência positiva durante um longo período, ou 1,5% durante um curto período de tempo, não superior a alguns minutos, e uma componente de sequência homopolar que não ultrapasse 1% da componente de sequência positiva [32].

4.2.1.2- Variações de frequência e de tensão durante o ensaio Eh-star

Durante a realização das medições, a frequência deverá manter-se dentro do limite de $\pm 0,3\%$ da frequência nominal.

Visto que o ensaio requer a variação da tensão de alimentação, de modo a ajustar a corrente de teste, não faz sentido haver restrições na tensão de alimentação durante as medições.

4.2.2-Instrumentação

A precisão do instrumento de medição é geralmente expressa como uma percentagem do valor de fim de escala.

Para instrumentos analógicos, as leituras de dados deverão ser observadas no terço superior da escala do instrumento.

Os instrumentos de medição de grandezas eléctricas devem ter uma classe de precisão de 0,2.

Os instrumentos utilizados para medir a frequência devem ter uma precisão de $\pm 0,1$.

Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Eh-star - análise crítica

A velocidade deve ser medida com uma precisão de 0,1% ou de 1 revolução por minuto, consoante o que conduzir ao menor erro.

A instrumentação utilizada para medir o binário deve ter uma precisão de $\pm 0,2\%$.

Os instrumentos utilizados para medir a temperatura dos enrolamentos devem ter uma precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$.

4.3-Procedimentos de ensaio

Previamente à realização do ensaio Eh-star, devem ser determinadas, as perdas de atrito e ventilação e as perdas no ferro através do ensaio em vazio. É, também, a partir deste ensaio que se determina a corrente consumida pelo motor em vazio.

Depois de montar o circuito, como mostra a figura 4.1, procede-se à medição da resistência do estator R_{VW} aos terminais V e W com os enrolamentos em estrela. O valor da resistência deve ser corrigido para a temperatura de 25°C .

Faz-se o arranque da máquina com o comutador S na posição 1 e deixa-se estabilizar as perdas à tensão nominal, isto é, para máquinas de indução alimentadas à frequência e tensão estipuladas, as perdas em vazio são consideradas estabilizadas quando a potência consumida, em vazio, varia 3% ou menos, quando medida a dois intervalos consecutivos de 30 minutos [30].

Mede-se novamente a resistência entre os terminais V e W, que será a resistência inicial do ensaio Eh-star ($R_{VW,ini}$).

Faz-se novamente o arranque do motor a tensão reduzida. Após o arranque acciona-se o comutador para a posição 2, inserindo a resistência R_{eh} entre as fases U e W, passando o motor a operar com tensões assimétricas.

Varia-se a tensão de alimentação para seis pontos de ensaio. Os pontos de ensaio devem ser escolhidos de forma a serem igualmente espaçados entre 150% e 75% da corrente nominal de fase, medida na fase V (I_V). O teste deve iniciar-se com a maior corrente, prosseguindo em ordem decrescente até à menor corrente. Uma vez que nas três fases circulam correntes de intensidades diferentes, o ensaio deve ser iniciado com a máquina a frio e realizado o mais rapidamente possível de modo a evitar o aquecimento excessivo dos enrolamentos.

Para cada ponto mede-se I_U , I_V , I_W , U_{UV} , U_{VW} , U_{WU} , $P_{el}=P_{UV}+P_{VW}$ e a velocidade de rotação.

No final das medições, desliga-se o motor e mede-se novamente a resistência do estator entre as fases V e W, que será a resistência final do ensaio Eh-star ($R_{VW,final}$).

4.4-Determinação das perdas adicionais

As perdas adicionais em carga são obtidas directamente pelo cálculo do fluxo de carga a partir do circuito equivalente em T (figura 4.4), incluindo as perdas por efeito de Joule (R_s) e as perdas no ferro (R_{Fe}), que devem ser conhecidas previamente à realização do ensaio.

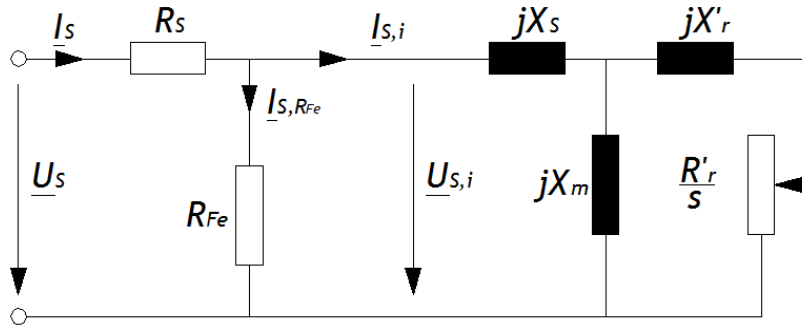


Figura 4.4 - Circuito equivalente em T da máquina de indução [29].

O total das perdas adicionais em carga do circuito em alimentação assimétrica $P_{ad,asym}$ é dado pela soma das perdas adicionais em carga das sequências positiva ($P_{ad,1}$) e negativa ($P_{ad,2}$) do sistema:

$$P_{ad,asym} = P_{ad,1} + P_{ad,2} = (1-s) \cdot (P_{\delta 1} - P_{\delta 2} - p_{fw}) \quad (10)$$

As potências no entreferro, de sequência positiva $P_{\delta 1}$ e negativa $P_{\delta 2}$ do sistema são calculadas a partir das correspondentes componentes positiva $P_{el,1}$ e negativa $P_{el,2}$ da potência de entrada, subtraindo as perdas no cobre p_s e as perdas no ferro p_{Fe} . Como já referido, as perdas no ferro p_{Fe} e mecânicas p_{fw} são obtidas previamente através do ensaio em vazio

$$p_{\delta} = 3 \cdot \text{Re} \left\{ \underline{U}_{si} \cdot \underline{I}_{si}^* \right\} = P_{el} - P_s - P_{Fe} \quad (11)$$

Assumindo que as perdas adicionais em carga da sequência positiva ($P_{ad,1}$) e negativa ($P_{ad,2}$) do sistema dependem do quadrado da sequência positiva ($I_{s,1}$) e negativa ($I_{s,2}$) da corrente do sistema, respectivamente, obtemos para a sequência negativa das perdas adicionais em carga:

$$P_{ad} = P_{ad,2} = P_{ad,asym} \cdot \frac{I_{s,2}^2}{(I_{s,1}^2 + I_{s,2}^2)} \quad (12)$$

Devido ao predomínio da corrente de sequência negativa da $I_{s,2} \gg I_{s,1}$ tal como no método rotação inversa ($s_2 = 2-s \approx 2$), as perdas adicionais em carga da sequência negativa do sistema são consideradas como sendo as perdas adicionais equivalentes do sistema, o que corresponde à componente da corrente dependente da carga $I_t \approx \sqrt{I_s^2 - I_0^2}$, com a corrente I_s em carga e I_0 em vazio.

As perdas adicionais em carga são obtidas a partir de uma análise de regressão linear de 6 pontos de carga, de forma a reduzir o efeito dos erros aleatórios das medições no ensaio (ver figura 4.5). As perdas devem ser expressas como uma função do quadrado da sequência negativa da corrente $I_{s,2}$ expressa como função da corrente de teste I_t :

$$P_{ad,asym} = A \cdot \left(\frac{I_{s,2}}{I_t} \right)^2 + B \quad (13)$$

A e B são constantes determinadas de acordo com as seguintes formulas:

$$\text{— } A \text{ é declive, de acordo com } A = \frac{i \times \sum (P_L \times T^2) - \sum P_L \times \sum T^2}{i \times \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2} \quad (14)$$

$$\text{— } B \text{ é a intercepção, de acordo com } B = \frac{\sum P_L}{i} - A \times \frac{\sum T^2}{i} \quad (15)$$

onde

i é o número de pontos de ensaio;

T^2 representa $\left(\frac{I_{s,2}}{I_t} \right)^2$.

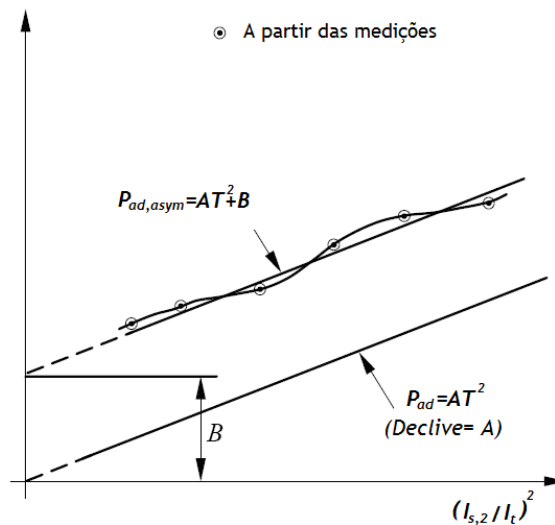


Figura 4.5 - Linearização dos dados das perdas residuais.

Quando o declive constante A é estabelecido, o valor das perdas adicionais em carga devem ser determinadas através da equação:

$$P_{ad} = A \cdot \left(\frac{I_{s,2}}{I_t} \right)^2 \quad (16)$$

Quando o coeficiente de correlação γ é inferior a 0,95, deve eliminar-se o pior ponto e repetir a regressão. Se $\gamma \geq 0,95$, usa-se a segunda regressão; Se γ permanece inferior a 0,95,

o ensaio não é satisfatório é possível que haja erros na instrumentação ou de leituras de ensaio, ou ambos. A fonte do erro deve ser investigada e corrigida, e o ensaio deve ser repetido. O coeficiente de correlação é dado pela seguinte expressão:

$$Y = \frac{i \times \sum (P_L \times T^2) - \sum P_L \times \sum T^2}{\sqrt{\left(i \times \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2 \right) \times \left(i \times \sum P_L^2 - (\sum P_L)^2 \right)}} \quad (17)$$

onde

i é o número de pontos de ensaio;

T^2 representa $\left(\frac{l_{s,2}}{l_t} \right)^2$.

4.5-O problema da incerteza

Devido ao facto de haver uma variação considerável na eficiência energética relatada pelos fabricantes e pelos laboratórios de ensaio, o comité técnico 2 do IEC constituiu um grupo de trabalho (WG 28) com o objectivo de iniciar um projecto de ensaios de motores eléctricos.

Pretende-se, com este projecto, determinar o grau de incerteza na eficiência reportada pelos ensaios.

Com a publicação, em 2007, da norma IEC 60034-2-1 abriu-se caminho para a concretização deste projecto já que uma das condições fundamentais era a existência de procedimentos de ensaio normalizados. Esta norma apresenta vários métodos de ensaio, incluindo o método B da IEEE 112 e o novo método Eh-star, indicados como de baixa, média ou alta incerteza.

Este projecto pretende portanto aferir da equivalência, em termos de incerteza, destes dois métodos ou seleccionar o método com menor incerteza. Os objectivos do projecto são, portanto:

- Recolha de mais experiência com os métodos de ensaio;
- Realizar um conjunto de ensaios que permitam avaliar os desvios de medição entre os diversos laboratórios;
- Numa fase posterior, melhorar e otimizar os métodos de ensaio propostos na IEC 60034-2-1;
- Fornecer uma base para rever os limites de tolerância da norma IEC 60034-13.

4.5.1-Programa de ensaios

O comité técnico 2 do IEC pretende então fazer um estudo dos parâmetros que estão relacionados com o erro de ensaio. Assim, identificou 5 categorias de parâmetro que podem ter influência no erro de ensaio:

- A precisão e interpretação de procedimento;
- Incerteza da instrumentação;
- Desvios de fabrico/material;

Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Eh-star - análise crítica

- Erros do operador;
- Variações do laboratório.

O programa de ensaios foi dividido em três partes de forma a abordar as categorias de parâmetros atrás descritas.

4.5.1.1-Parte 1

Os laboratórios deverão realizar ensaios no mesmo motor, usando o método de ensaio em carga e o método Eh-star. Cada laboratório deverá fornecer pelo menos cinco relatórios de ensaio, abrangendo os dois métodos de ensaio.

Cada ensaio deve ser espaçado no tempo de um mínimo de uma semana, utilizando diferentes bancas de ensaio e aparelhos de medida. Após cada ensaio devem ser analisados os resultados para identificar as fontes de incerteza. A verificação da fonte de incerteza é feita no ensaio seguinte, modificando o procedimento de ensaio, ainda que dentro dos limites da norma.

Os resultados obtidos deverão ajudar a identificar os erros do operador e a precisão do ensaio. Assim, será possível determinar a influência das tolerâncias de ensaio e quantificar as diferenças entre os métodos.

4.5.1.2-Parte 2

O objectivo desta etapa é relacionar quantificar a incerteza causada pelos materiais utilizados no fabrico dos motores e pelos correspondentes processos de fabrico.

Pretende-se que os laboratórios associados a fabricantes de motores forneçam pelo menos cinco relatórios de ensaio relativos a cinco motores fabricados segundo o mesmo projecto, do mesmo design, mas de ciclos de fabrico diferentes.

4.5.1.3-Parte 3

Nesta etapa pretende-se justificar a incerteza associada às diferentes interpretações do procedimento de ensaio, da instrumentação usada em cada laboratório e devida às variações de pessoal.

Pretende-se então que se façam ensaios a pelo menos três motores de diferentes gamas de potência. Cada motor será enviado para cinco laboratórios diferentes, sendo ensaiados através do método de ensaio em carga e do método Eh-star, sendo feita uma comparação de desempenho às frequências de 50 e 60 Hz

Com estes resultados deverá ser, então, possível quantificar a diferença entre os métodos e determinar a influência dos laboratórios na incerteza.

4.5.2-Resultados

Concordaram em participar 21 laboratórios repartidos por 9 países. Em relação à parte 1 do projecto, os laboratórios completaram 13 conjuntos de dados o que corresponde a 50% dos

resultados esperados. Na parte 2, os laboratórios participantes completaram 9 conjuntos de dados, o que representa apenas 34% dos resultados esperados. Por último, na parte 3 apenas 5 conjuntos de dados foram completados abrangendo apenas 3 dos motores.

Os resultados completos do projecto ainda não são conhecidos, estando previsto que se tornem públicos durante o ano de 2009 [33].

Capítulo 5

Actividade laboratorial

5.1-Introdução

A eficiência de um motor é definida como o rácio entre a potência útil (mecânica) e a potência absorvida pelo motor, num dado regime de carga. Existem dois tipos de métodos para medir a eficiência de motores eléctricos: directo e indirectos.

O método directo consiste na medição da potência eléctrica activa absorvida, com tensão e frequência de alimentação estipuladas, e da potência útil disponibilizada no veio do motor, em função do binário disponível no seu veio.

Neste caso a eficiência do motor é dada pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{\text{Potência útil}}{\text{Potência absorvida}} \quad (18)$$

Os métodos indirectos consistem na medição da potência eléctrica absorvida e no cálculo da potência útil. A potência útil obtém-se subtraindo daquela as perdas que ocorrem no motor em cada regime de carga. Neste caso, a eficiência do motor é dada pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{\text{Potência absorvida} - \text{Perdas}}{\text{Potência absorvida}} \quad (19)$$

As perdas que ocorrem num motor de indução de rotor em gaiola de esquilo podem ser divididas em 4 categorias:

- i. Perdas por atrito e ventilação, usualmente designadas como mecânicas: perdas provocadas pelo atrito das várias partes móveis do motor e pela energia absorvida pelos ventiladores acoplados ao veio.
- ii. Perdas por efeito de Joule no rotor e estator, usualmente designadas como eléctricas: perdas provocadas pela circulação de corrente nos enrolamentos do estator e na gaiola rotórica.
- iii. Perdas no ferro: perdas provocadas pela saturação magnética das partes metálicas activas do motor.
- iv. Perdas adicionais em carga: perdas produzidas pela corrente de carga nas partes activas do ferro e outras partes metálicas à excepção dos condutores dos enrolamentos; perdas por correntes de Foucault nos condutores dos enrolamentos causadas por pulsações do fluxo dependente da corrente de carga e perdas adicionais nas escovas causadas pelas comutações.

A actividade desenvolvida no laboratório ao longo deste trabalho teve como principal objectivo a realização do ensaio Eh-star e dos ensaios complementares necessários para o tratamento dos resultados do mesmo, incluindo a determinação da eficiência de um motor de indução.

Num primeiro passo realizou-se o estudo térmico da máquina, estudo este, necessário para determinar as condições térmicas nominais de funcionamento do motor a ensaiar.

Foi necessário também obter separadamente a parcela de perdas no ferro do motor, necessária para determinar a queda de tensão no ferro do estator. Para obter estas perdas realizou-se um ensaio em vazio a tensão variável.

A realização do ensaio em carga teve como objectivo a determinação das perdas por efeito de Joule no estator e no rotor do motor. Apesar da realização deste ensaio não ser importante para a obtenção das perdas adicionais em carga, pelo método Eh-star, permitiu obter todas as parcelas de perdas necessárias para a posterior determinação da eficiência eléctrica do motor.

Na actividade estritamente laboratorial, ou seja, o tempo gasto efectivamente na realização dos ensaios, totalizou cerca de oitenta horas.

5.2-Caracterização laboratorial

O espaço físico da realização de um ensaio a uma máquina eléctrica assim como os equipamentos de medida e ensaio utilizados são pontos importantíssimos na validação e posterior utilidade do mesmo. Os ensaios decorreram no LME1 (Laboratório de Máquinas Eléctricas 1) do DEEC/FEUP (J001). Este laboratório possui uma área de aproximadamente 51 m², não possuindo qualquer tipo de ventilação forçada.

5.3-Características do motor

De acordo com a respectiva chapa de características, o motor ensaiado possui as seguintes características principais:



Figura 5.1 - Motor ensaiado.

Tabela 5.1- Características gerais do motor.

Fabricante:	WEG
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1
Tipo de motor:	IEC Design N
Número de série:	20APR04BM53734
Potência (kW):	5,5
Velocidade de sincronismo (rpm):	1500
Velocidade à plena carga (rpm):	1465
Grau de protecção:	IP55
Tamanho:	132S
Tensão nominal:	400
Tipo de aplicação do motor:	Motor de aplicação geral
Ligação dos enrolamentos estatóricos:	Triângulo
Corrente nominal (A):	10,4
Frequência de funcionamento (Hz):	50
Factor de potência:	0,85
Número de pólos:	4
Rendimento nominal (%):	89,5
Peso (kg):	66
Classe de Isolamento:	F
Temperatura Ambiente (°C)	40

5.4-Fonte de alimentação

5.4.1-Characterização genérica

Dadas as imposições em termos de qualidade da forma de onda da tensão eléctrica exigida pela norma IEC 60034-1, foi necessário fazer uma avaliação das fontes de alimentação disponíveis no LME1 para a realização dos ensaios pretendidos. As alternativas disponíveis limitavam-se à utilização da rede de energia da rede pública ou ao uso de um grupo motor-alternador disponível no mencionado laboratório de ensaios.

5.4.2-Grupo motor-gerador

A fonte de alimentação escolhida para os ensaios (figura 5.2) é composta por um motor assíncrono trifásico, um gerador síncrono e um auto-transformador. O grupo é controlado por um variador de velocidade (VEV). As características das máquinas são apresentadas na tabela 5.2.



Figura 5.2 - Grupo Motor-Gerador.

Tabela 5.2 - Características das máquinas do grupo motor-gerador.

	Motor de indução trifásico	Gerador síncrono trifásico
Fabricante/Tipo	EFACEC- BF 5 18L64	SICMEMOTORI - 3CN28-2L14
Potência	22/26,4 kW	20 kVA
Velocidade (r.p.m.)	1455/1750	1500
Tensão	Δ 380-415/440-480 V	$\Delta\Delta/YY/\Delta/Y$ 115/200/230/400 V
Frequência (Hz)	50	50
Corrente	43/44 A	100/57,7/50/28,9 A
Factor de potência	0,86/0,87	0,8
Tipo de aplicação	S1	S1
Classe de isolamento	F	H
Tensão de excitação	-	18,3V
Corrente de excitação	-	1,61A

5.4.3-Auto-transformador

De modo a se poder fazer uma correcto ajuste e variação da tensão de alimentação do motor utilizou-se um auto-transformador. As suas principais características são apresentadas na tabela 5.3.



Figura 5.3 - Auto-transformador.

Tabela 5.3 - Características gerais do Auto-transformador.

Equipamento	Marca	Tipo	Especificações
Auto-transformador	METREL	HTN 0903	0-450V / 13A / 10,14kVA

5.4.4-Factor de distorção harmónica

Como já foi referido no capítulo anterior, o factor de distorção harmónica da tensão (HVF) da fonte de alimentação não deverá ser superior a 0,015 para o ensaio térmico de motores AC trifásicos e 0,03 para as restantes situações de funcionamento de motores AC trifásicos de tipo N.

A determinação do factor de distorção harmónica da tensão deve ser efectuada através da computação da seguinte expressão:

$$HVF = \sqrt{\frac{k}{\sum_{n=2}^k} \frac{u_n^2}{n}} \quad (20)$$

Onde

u_n é o rácio entre o valor eficaz da tensão harmónica U_n de ordem n e a tensão nominal U_N

n é a ordem do harmónico

$k = 13$

5.4.4.1-Análise da onda de tensão com a fonte em vazio

Com o grupo gerador a funcionar em vazio, obteve-se nos terminais de saída do auto-transformador o seguinte sistema de tensões.

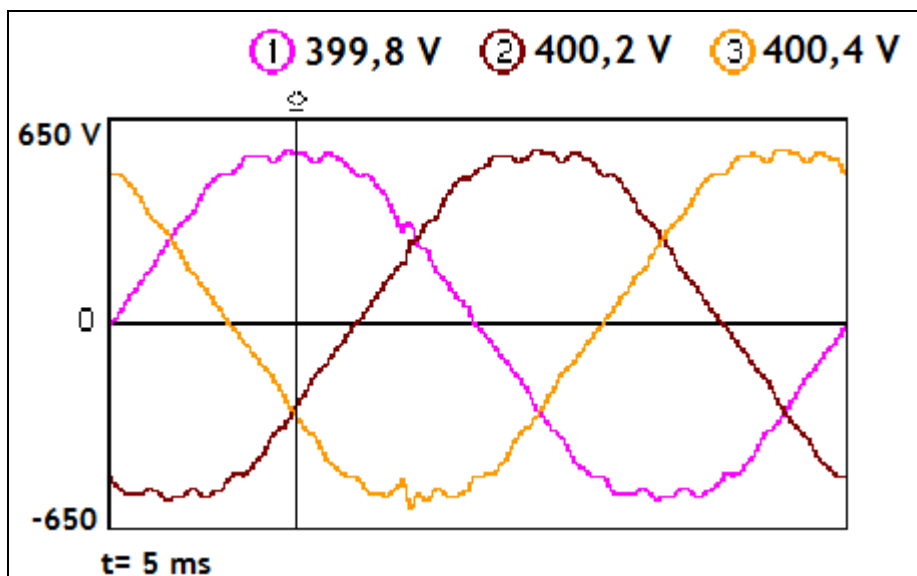


Figura 5.4 - Sistema trifásico de tensões da fonte de alimentação em vazio.

Na figura 5.4 pode observar-se o espectro correspondente ao sistema de tensões gerado pela fonte. Numa primeira análise pode-se verificar que esta fonte apresenta como principal harmónico o de 5ª ordem (correspondente a 250 Hz).

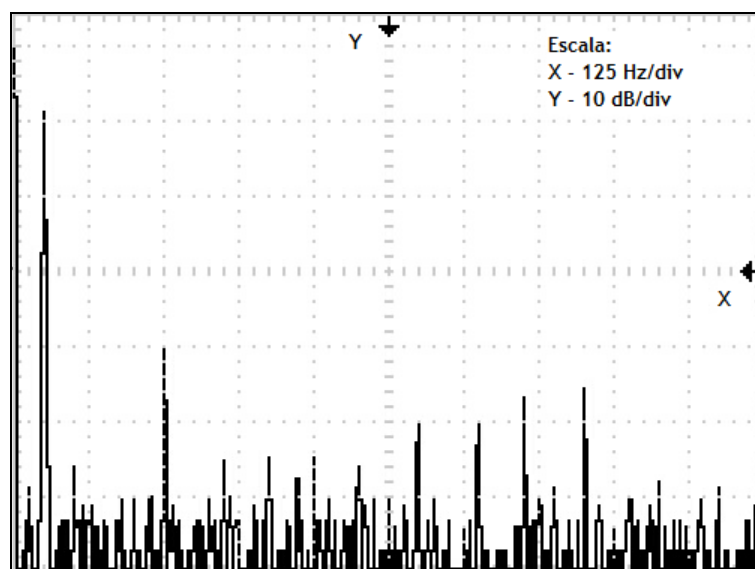


Figura 5.5 - Espectro do sistema de tensões gerado em vazio.

O valor de tensão para cada frequência pode ser obtido através da expressão

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U}{U_b} \right) \quad (21)$$

onde

L é o nível de sinal, em dB;

U é a tensão, em V;

Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Eh-star - análise crítica

U_b é a tensão de base, em V.

Na tabela 5.4 são apresentados os valores da tensão harmónica e o valor do factor de distorção harmónica (HVF).

Tabela 5.4 - Análise espectral da onda gerada em vazio.

n	Frequência [Hz]	Amplitude [dB]	U_n/U_b	U_n [V]	u_n^2/n
1	50	5,85	1,961101	404,4731	-
2	100	-41,3	0,00861	1,775782	9,64E-06
3	150	-49,3	0,003428	0,706952	1,02E-06
4	200	-54,9	0,001799	0,371013	2,1E-07
5	250	-25,7	0,05188	10,70015	0,00014
6	300	-49,3	0,003428	0,706952	5,09E-07
7	350	-45,3	0,005433	1,120443	1,1E-06
8	400	-52,5	0,002371	0,489091	1,83E-07
9	450	-54,9	0,001799	0,371013	9,35E-08
10	500	-42,5	0,007499	1,546642	1,46E-06
11	550	-54,9	0,001799	0,371013	7,65E-08
12	600	-49,3	0,003428	0,706952	2,55E-07
13	650	-52,5	0,002371	0,489091	1,12E-07
				HVF	0,012435

Nota: tomaram-se todos os termos, incluindo os múltiplos de 3, já que o objectivo desta análise é a avaliação da qualidade da fonte de tensão usada, independentemente do tipo de carga que a mesma alimentará.

5.4.4.2-Análise da tensão e da corrente com o motor à plena carga

Já com o motor de ensaio à plena carga, o conteúdo harmónico da tensão disponibilizada pela fonte de alimentação foi o seguinte:

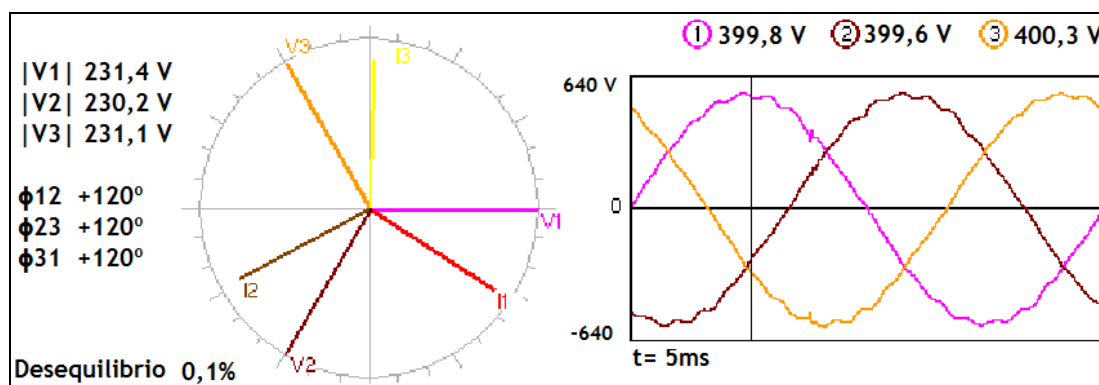


Figura 5.6 - Sistema trifásico de tensões com o motor à plena carga.

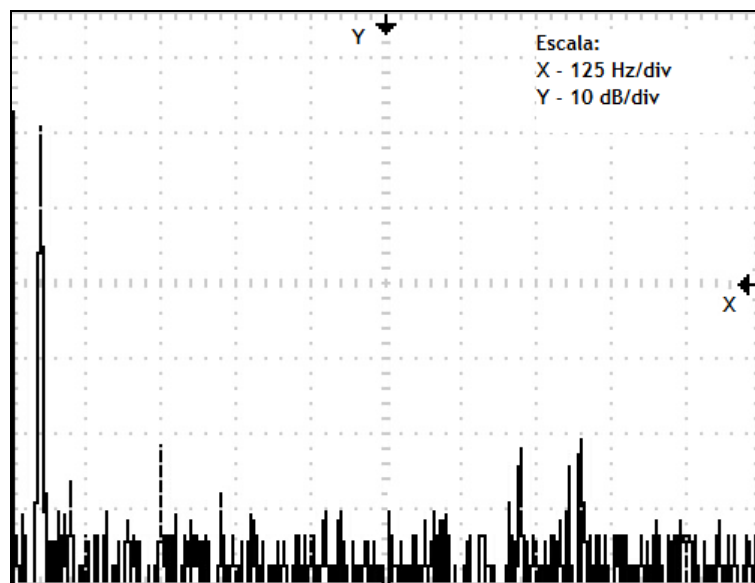


Figura 5.7 - Espectro da tensão com o motor à plena carga.

Tabela 5.5 - Análise espectral da tensão gerada com o motor à plena carga.

n	Frequência [Hz]	Amplitude [dB]	U_n/U_b	U_n [V]	u_n^2/n
1	50	5,85	1,961101	406,5512	-
2	100	-42,5	0,007499	1,554588	7,39E-06
3	150	-52,2	0,002455	0,50888	5,28E-07
4	200	-54,9	0,001799	0,37292	2,13E-07
5	250	-37,3	0,013646	2,828885	9,78E-06
6	300	-54,9	0,001799	0,37292	1,42E-07
7	350	-40,9	0,009016	1,869026	3,05E-06
8	400	-46,5	0,004732	0,980879	7,35E-07
9	450	-54,9	0,001799	0,37292	9,45E-08
10	500	-42,9	0,007161	1,48462	1,35E-06
11	550	-48,5	0,003758	0,77914	3,37E-07
12	600	-49,3	0,003428	0,710584	2,57E-07
13	650	-54,9	0,001799	0,37292	6,54E-08
				<i>HVF</i>	0,004893

Nas mesmas condições, o conteúdo harmónico da corrente consumida pela fase U do motor de ensaio, foi:

Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Ehstar - análise crítica

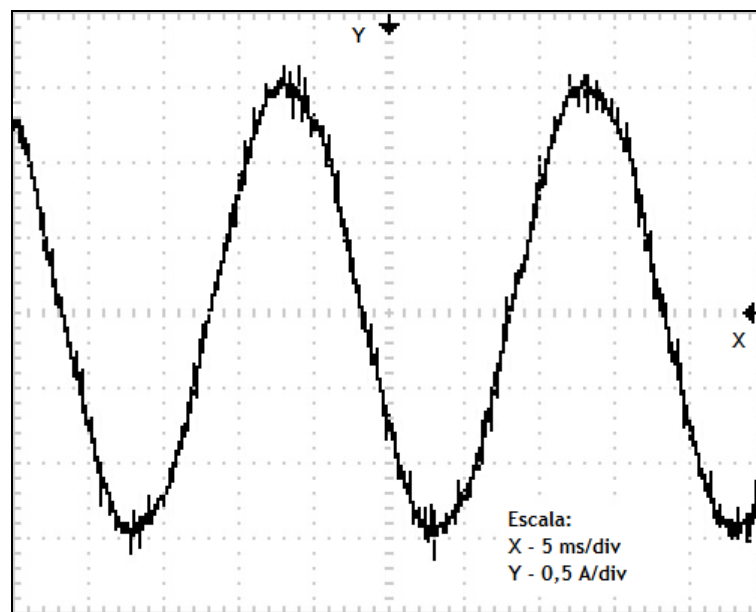


Figura 5.8- Forma de onda da corrente na fase U.

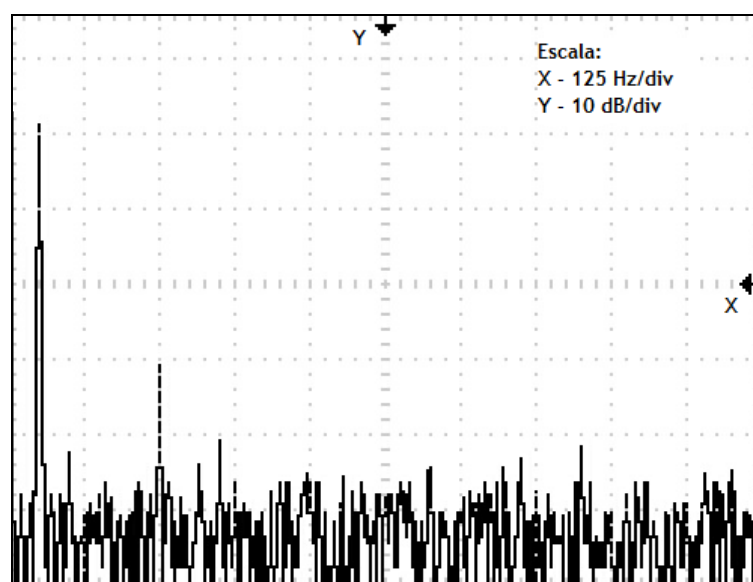


Figura 5.9 - Espectro da corrente com o motor à plena carga.

Tabela 5.6 - Análise espectral da corrente com o motor à plena carga.

n	Frequência [Hz]	Amplitude [dB]	I_n/I_b	I_n [A]	i_n^2
1	50	0,231	1,026952	10,37814	-
2	100	-44,6	0,005888	0,059507	2,16451E-08
3	150	-49	0,003548	0,035857	7,85886E-09
4	200	-54,6	0,001862	0,018818	2,16451E-09
5	250	-31,8	0,025704	0,259758	4,12439E-07
6	300	-58,6	0,001175	0,011873	8,61707E-10
7	350	-44,2	0,006166	0,062312	2,37334E-08
8	400	-51,4	0,002692	0,0272	4,5223E-09
9	450	-49	0,003548	0,035857	7,85886E-09
10	500	-47,4	0,004266	0,043109	1,13595E-08
11	550	-58,6	0,001175	0,011873	8,61707E-10
12	600	-54,6	0,001862	0,018818	2,16451E-09
13	650	-47,4	0,004266	0,043109	1,13595E-08
				HCF	0,000711919

5.4.4.3-Análise da tensão e da corrente com o motor a meia carga

Por sua vez, com o motor de ensaio a meia carga, os conteúdos harmónicos da tensão da alimentação e da corrente na linha, foram:

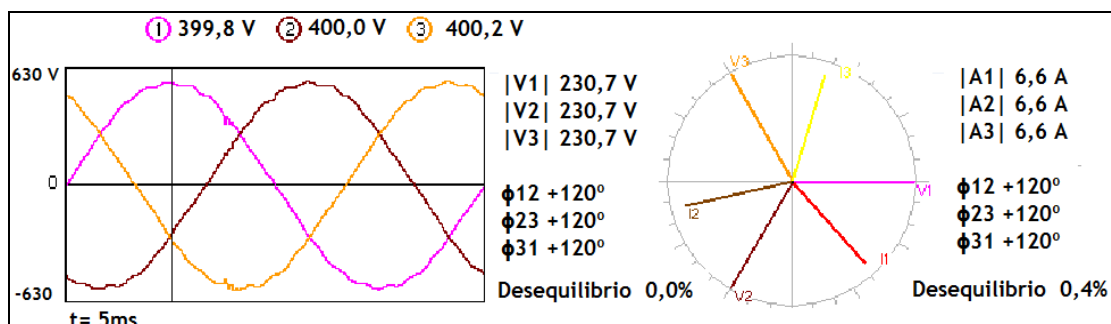


Figura 5.10 - Sistema de tensões com o motor a meia carga.

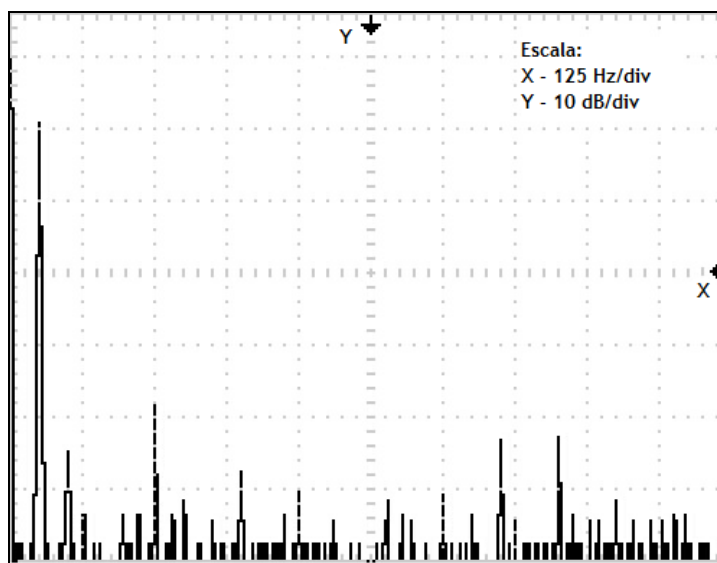


Figura 5.11 - Espectro da tensão com o motor a meia carga.

Tabela 5.7 - Análise espectral da tensão com o motor a meia carga.

n	Frequência [Hz]	Amplitude [dB]	U_n/U_b	U_n [V]	u_n^2/n
1	50	5,83	1,956591	405,7391	-
2	100	-47,4	0,004266	0,8846	2,39E-06
3	150	-47,4	0,004266	0,8846	1,59E-06
4	200	-50,2	0,00309	0,640836	6,28E-07
5	250	-31,8	0,025704	5,330241	3,47E-05
6	300	-55,4	0,001698	0,352166	1,26E-07
7	350	-46,2	0,004898	1,015657	9,01E-07
8	400	-51,8	0,00257	0,533024	2,17E-07
9	450	-58,6	0,001175	0,243639	4,03E-08
10	500	-44,6	0,005888	1,221088	9,11E-07
11	550	-47,4	0,004266	0,8846	4,35E-07
12	600	-61	0,000891	0,184819	1,74E-08
13	650	-49,4	0,003388	0,702663	2,32E-07
				<i>HVF</i>	0,006498

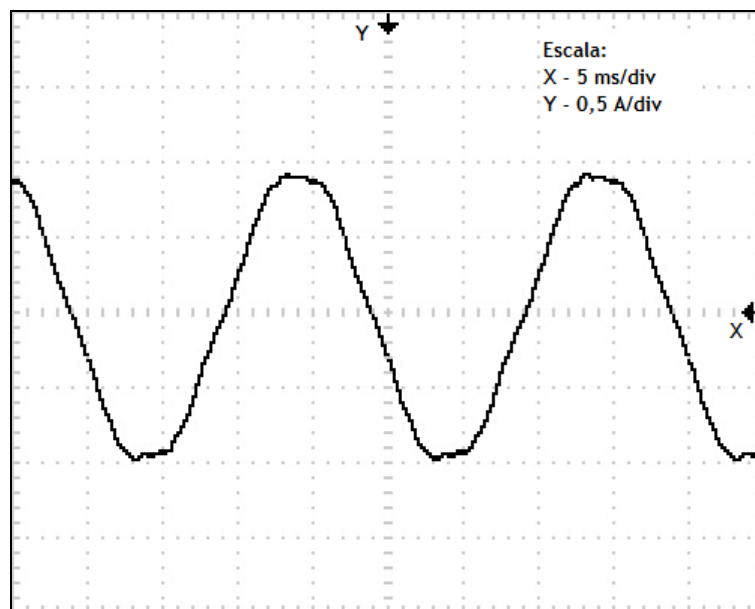


Figura 5.12 - Forma de onda da corrente com o motor a meia carga.

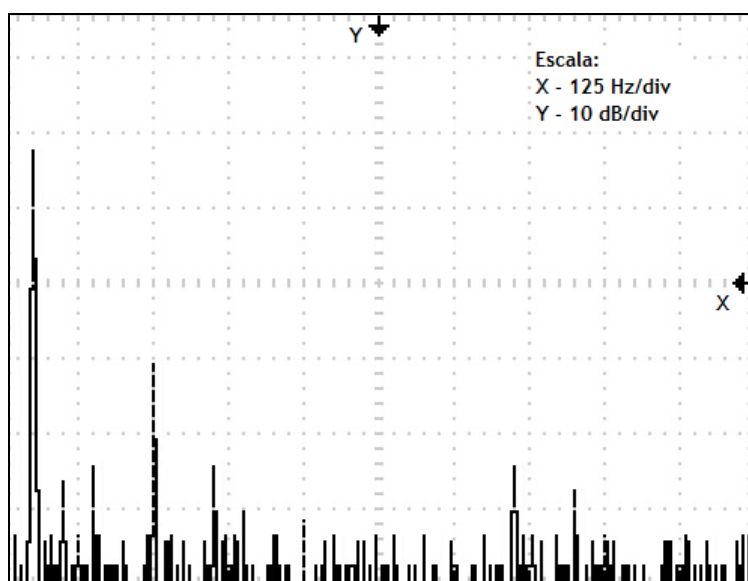


Figura 5.13 - Espectro da corrente com o motor a meia carga.

Tabela 5.8 - Análise espectral da corrente com o motor a meia carga.

n	Frequência [Hz]	Amplitude [dB]	I_n/I_b	$I_n [A]$	i_n^2
1	50	-3,39	0,676862	6,587585	-
2	100	-50,6	0,002951	0,028723	5,04282E-09
3	150	-49,8	0,003236	0,031494	6,0628E-09
4	200	-58,6	0,001175	0,011435	7,99232E-10
5	250	-31,8	0,025704	0,250165	3,82537E-07
6	300	-67	0,000447	0,004347	1,15524E-10
7	350	-45,4	0,00537	0,052267	1,66983E-08
8	400	-53	0,002239	0,021788	2,90184E-09
9	450	-64,6	0,000589	0,005731	2,00758E-10
10	500	-54,6	0,001862	0,018123	2,00758E-09
11	550	-56,2	0,001549	0,015074	1,38891E-09
12	600	-67	0,000447	0,004347	1,15524E-10
13	650	-67	0,000447	0,004347	1,15524E-10
HCF					0,000646518

5.4.4.4- Conclusão

Como se pode verificar, pelo exposto anteriormente, a fonte de alimentação escolhida para a realização dos ensaios encontra-se dentro dos limites impostos pela norma IEC 60034-1, no que respeita ao conteúdo harmónico da tensão e da corrente.

5.5-Banca de ensaio

Para a realização do ensaio de aquecimento do motor foi necessário utilizar uma banca de ensaio com dinamómetro. A banca de ensaio de máquinas rotativas disponível no LME1 (figura 5.14) é basicamente composta por uma máquina de corrente contínua, que funciona como carga ou como gerador, acoplada a uma balança. A banca de ensaios possui ainda um grupo motor-gerador auxiliar que permite fazer a recuperação de parte da energia do sistema.



Figura 5.14 - Aspecto geral da banca de ensaios.

Conforme se pode ver no esquema eléctrico da banca de ensaio representado na figura 5.15, a mesma apresenta as seguintes características gerais:

- Possibilidade de funcionamento em regime de accionamento, como motor, e de frenagem, como gerador;
- Recuperação de energia, injectando-a na rede, evitando encargos suplementares da sua dissipação e aquisição;
- Indicação directa do binário desenvolvido pela máquina a ensaiar.

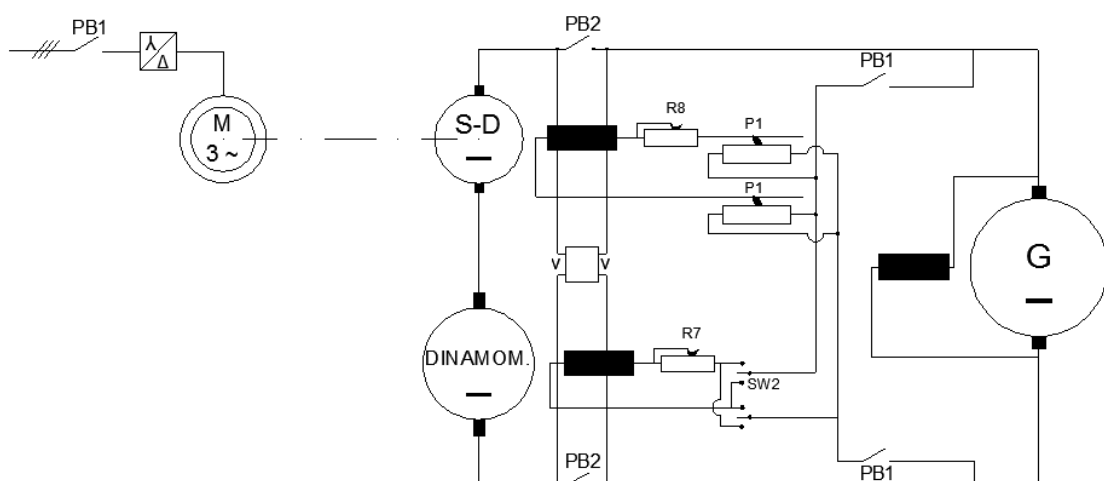


Figura 5.15 - Esquema de princípio da banca de ensaios.

Em termos individuais, as principais características das máquinas constituintes da banca de ensaio e do correspondente sistema de recuperação de energia, são as seguintes [32]:

Dinamómetro - máquina de corrente contínua

- Fabricante: Ateliers de Construction Oerlinkon, Zurich, Suíça
- Tipo: G 153 c 4 - F B3/W
- Motor n. 981 321 LO 1.1
- Potência de ensaio como gerador entre 1.3 e 12 kW
- Potência de ensaio como motor entre 1.1 e 9,75 kW
- Velocidade de ensaio entre 150 e 3000 r.p.m.
- Tensão de alimentação como motor igual a 100V
- Tensão produzida como gerador entre 76 e 167 V
- Corrente máxima de serviço como motor igual a 55A
- Corrente máxima de serviço como gerador igual a 63 A
- Corrente máxima de excitação igual a 9,5 A
- Classe de protecção P 21

Ventilador auxiliar - motor de indução trifásico

- Fabricante: Ateliers de Construction Oerlinkon, Zurich, Suíça
- Tipo: K37 om 2 - B5/100
- Motor n. 146 496 L01.4
- Potência nominal igual a 0,22 kW
- Corrente nominal igual a 0,75 A
- Tensão nominal igual a 380 V
- Velocidade nominal igual a 2770 r.p.m.
- Classe de isolamento E
- Classe de protecção P 32

Gerador auxiliar (S-D) - máquina de corrente contínua

- Fabricante: Ateliers de Construction Oerlinkon, Zurich, Suíça
- Tipo: G 149 C 4 F
- Máquina n. 981 321 L 01.4
- Potência nominal igual a 5.1 kW ASE
- Velocidade nominal igual a 2850 r.p.m. (4 pólos)
- Tensão nominal igual a 85V
- Corrente nominal igual a 60A
- Corrente de excitação igual a 2,3A
- Classe de isolamento E
- Classe de protecção P 21

Motor auxiliar - motor de indução trifásico

- Fabricante: Ateliers de Construction Oerlinkon, Zurich, Suíça
- Tipo: K 149 C 2 B3/B9
- Arranque estrela- triângulo
- Motor n. 981 321 L 03.1
- Potência nominal igual a 7,5 kW ASE

Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Eh-star - análise crítica

- Velocidade nominal igual a 2850 r.p.m.
- Tensão nominal igual a 380 V
- Frequência nominal igual a 50Hz
- Corrente nominal igual a 16 A
- Classe de isolamento E
- Classe de protecção P 12

Grupo gerador de 110V- DC

- Fabricante: SICMEMOTORI
- Tipo: P160 S2 PV/B3
- Máquina n. 0860/02/1
- Potência nominal igual a 10 kW
- Velocidade nominal igual a 1500 r.p.m.
- Tensão nominal igual a 110 V
- Corrente nominal igual a 90,9 A
- Corrente de excitação igual a 3,18A
- Classe de isolamento H

5.5.1-Balança de medição de binário

A banca de ensaio instalada no LME1 está equipada com um sistema de indicação de binário através de uma balança, permitindo medidas por leitura directa (ver figura 5.16).



Figura 5.16 -Balança de medição de binário

5.5.1.1-Sistema de indicação de binário

A figura 5.17 representa esquematicamente o mecanismo de compensação e indicação de binários. De um modo geral, o sistema pode ser descrito da seguinte forma:

O peso morto do sistema de alavancas é equilibrado por um contrapeso G, o seu deslocamento, realizado com um parafuso de regulação permite ajustar o zero.

O amortecedor D, introduz um atrito no deslocamento da agulha até à posição de equilíbrio, quando se carrega ou descarrega o dinamómetro, evitando vibrações prejudiciais. A agulha é accionada por uma roda dentada de aço e uma peça de comando A.

A força aplicada à extremidade do braço alavanca pelo dinamómetro é transmitida pela peça B ao sistema de alavancas do indicador. A peça U destina-se a fazer com que esta força se desloque sempre no mesmo sentido, seja a máquina submetida a tracção ou a pressão, o que depende do sentido de rotação e do tipo de serviço do dinamómetro [32].

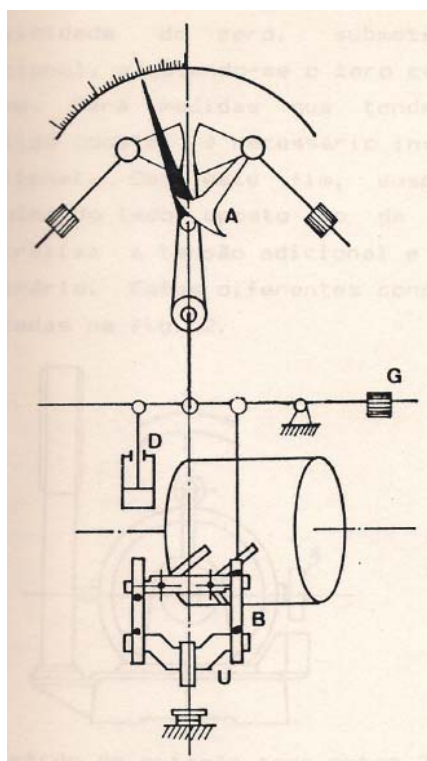


Figura 5.17 - Esquema do mecanismo de indicação de binário [32].

5.6-Equipamentos de medida utilizados

5.6.1-Banca de medida de resistência eléctrica

Tabela 5.9 - Caracterização dos aparelhos de medida da banca de medição da resistência.

Equipamento	Marca	Tipo	Especificações	Precisão	Observações
Acumulador	CARTER	Pb	Tensão 12V/ Capacidade 40Ah		-
Reóstato	Leroy-Somer	Rec 22	Corrente: 18,6A/ Resistência: 2,42Ω		-
Amperímetro	SAMAR	SL 150 B/NC	Amperímetro analógico DC	0,5%	Escala 10A
Multímetro	FLUKE	79 III	Voltímetro digital DC	0,3%	-

5.6.2-Medida de grandezas eléctricas

Na aquisição das grandezas eléctricas foi utilizado um analisador de potência da marca NORMA, tipo AC Power Analyzer D 5255 M, com as seguintes características:

Tabela 5.10 - Limites de erro do analisador de potência.

Funcionamento	Gama de frequências	Gama de valores	Limites de erro $\pm(x\% \text{ do valor medido} + y\% \text{ da gama})$
Medição de tensões	>45 a 65 Hz	65 a 650 V	$\pm(0.1 \% + 0.1 \%)$
Medição de correntes		0.1 a 50 A	
Medição de frequências	-	10 a 100 Hz	$\pm 0.1 \%$

Dado que a alimentação do motor, durante a realização do ensaio Eh-star, é propositadamente assimétrica, é necessário ter em atenção as ligações internas do analisador, para que não seja estabelecido trajecto de retorno para a componente homopolar da corrente através do neutro. A figura 5.18 mostra o esquema de ligações para a medição de potências trifásicas assimétricas que garante esta condição (neutro virtual isolado).

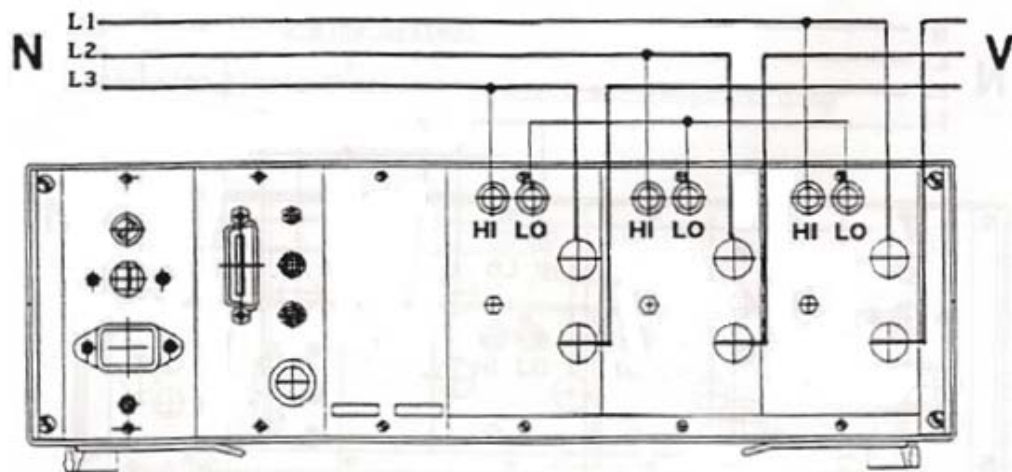


Figura 5.18 - Diagrama de ligação do analisador de potência.

5.6.3-Medição da velocidade

Na medição de velocidades de rotação, foi usado:

Tabela 5.11 - Especificações do aparelho de medição da velocidade.

Equipamento	Marca	Tipo	Especificações	Precisão	Observações
Tacómetro	PROVA	RM-1000	Digital Optical Tachometer	$\pm 0,01\%$	-

5.6.4-Medição da temperatura

Na medição de temperaturas foram usados:

Tabela 5.12 - Caracterização dos aparelhos de medição da temperatura.

Equipamento	Marca	Tipo	Especificações	Precisão	Observações
Termopar	-	-	Tipo K	-	Sonda interna
Multímetro	FLUKE	179	Termómetro	1%	-
Termopar	-	-	Tipo K	-	Sonda externa
Multímetro	FLUKE	179	Termómetro	1%	-
Termopar	-	ST2 1000	Tipo K	-	Temperatura ambiente
Multímetro	FLUKE	183	Voltímetro DC	0.07%	-

Adicionalmente, foi ainda possível recorrer a uma câmara digital termográfica (por infravermelhos) cujas características são as seguintes:

Tabela 5.13 - Caracterização da câmara termográfica.

Equipamento	Marca	Tipo	Especificações	Precisão	Observações
Câmara termográfica	FLIR Systems	BCAM SD	-10 °C a +100°C	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 0,2\%$	-

5.6.5-Osciloscópio

Por último, quando necessário recorreu-se a um osciloscópio:

Tabela 5.14 - Caracterização do Osciloscópio.

Equipamento	Marca	Tipo
Osciloscópio	Tektronix	TDS 1001B

5.7-Cálculo da resistência do estator

Na figura 5.19 pode observar-se o esquema eléctrico de medição da resistência de fase do enrolamento do estator no início do ensaio térmico. A realização da medida eléctrica da resistência foi efectuada directamente nos terminais dos enrolamentos, com o rotor parado. A intensidade de corrente de ensaio foi limitada através de um reóstato e a medição foi efectuada o mais rápido possível, de forma a evitar erros devidos ao aquecimento dos enrolamentos.

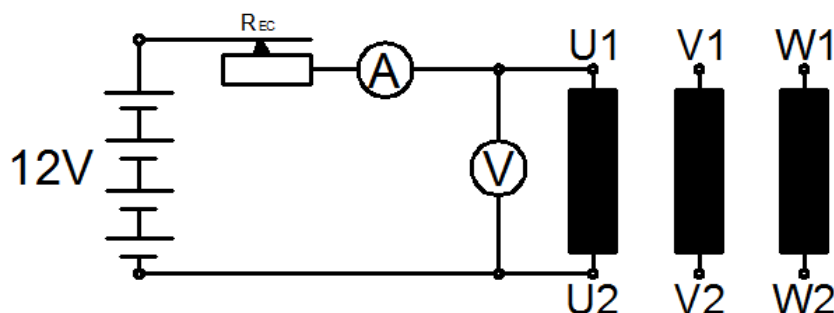


Figura 5.19- Esquema de medição da resistência do estator.

Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Ehstar - análise crítica

O valor da resistência eléctrica, em corrente contínua, do circuito é dado pelo quociente entre o valor da tensão (U_{DC}) e o valor da intensidade da corrente (I_{DC}).

$$R = \frac{U_{DC}}{I_{DC}} \quad (22)$$

Ao valor calculado de resistência é necessário subtrair o valor da resistência, em corrente contínua, dos cabos de ligação. Na tabela 5.15 são apresentadas as leituras do amperímetro e do voltímetro, assim como o valor da resistência de cada fase do estator.

Tabela 5.15 - Resistência dos condutores de ligação (a 18°C).

Condutor	V_{DC} [V]	V_{DC} [V]	R_{cond} [Ω]
U	0,087	4,010	0,022
V	0,073	4,010	0,018
W	0,055	3,990	0,014

Tabela 5.16 - Resistência de fase dos enrolamentos estatóricos (a 18°C).

Terminais	V_{DC} [V]	V_{DC} [V]	R [Ω]
U1-U2	2,36	5,19	2,159
V1-V2	2,34	5,22	2,191
W1-W2	2,34	5,22	2,191

Os valores apresentados na tabela anterior dizem respeito a medições feitas à temperatura ambiente de 18°C, subtraindo o valor da resistência dos condutores de ligação. É necessário ainda fazer a correcção da resistência para a temperatura de 25°C. A correcção do valor da resistência foi efectuada aplicando a seguinte fórmula:

$$R_b = \frac{R_a \cdot (t_b + k1)}{t_a + k1} \quad (23)$$

Onde

R_a é o valor da resistência conhecida, em ohms, à temperatura t_a ;

R_b é o valor corrigido da resistência, em ohms, para a temperatura t_b ;

t_a é o valor da temperatura, em °C, quando a resistência R_a foi medida (18°C);

t_b é o valor da temperatura, em °C, para a qual a resistência deve ser corrigida (25°C);

$k1$ é igual a 235 (condutores em cobre).

Para se obter o valor da resistência entre um par de terminais (como é definida na norma IEC 60034-2-1) do estator é necessário ter em conta as ligações do estator. Na realização dos ensaios de temperatura, em vazio e em carga, os enrolamentos do estator foram ligados em triângulo. Esta opção deveu-se ao facto da fonte de alimentação estar limitada aos 400V.

5.7.1-Ligação em triângulo

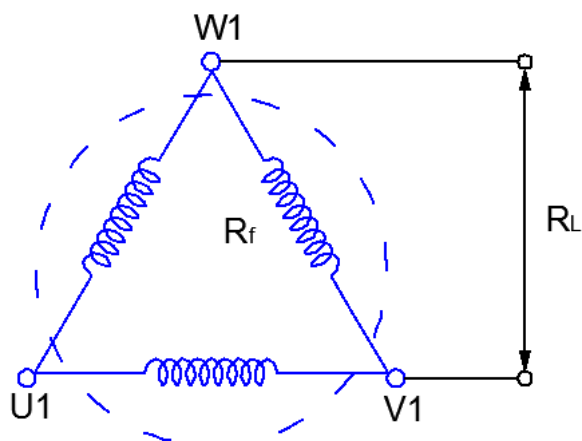


Figura 5.20 - Ligação em triângulo

A resistência entre um par de terminais para uma ligação em triângulo é dada pelo paralelo das resistências de fase.

$$R_{L,1-2} = \frac{R_{f1} \cdot (R_{f2} + R_{f3})}{R_{f1} + R_{f2} + R_{f3}}; \quad R_{L,2-3} = \frac{R_{f2} \cdot (R_{f1} + R_{f3})}{R_{f1} + R_{f2} + R_{f3}}; \quad R_{L,3-1} = \frac{R_{f3} \cdot (R_{f1} + R_{f2})}{R_{f1} + R_{f2} + R_{f3}}; \quad R_L = \frac{\sum R_{L,j-k}}{3} \quad (24)$$

Tabela 5.17 - Resistência de linha para ligação dos enrolamentos do estator em triângulo (a 18°C).

Terminais		U1-V1	V1-W1	W1-U1
Resistência de fase	R_f [Ω]	2,159	2,191	2,191
Resistência de linha	$R_{L,j-k}$ [Ω]	1,447	1,457	1,457
Resistência de linha - Média	R_L [Ω]	1,454		

5.7.2-Ligação em estrela

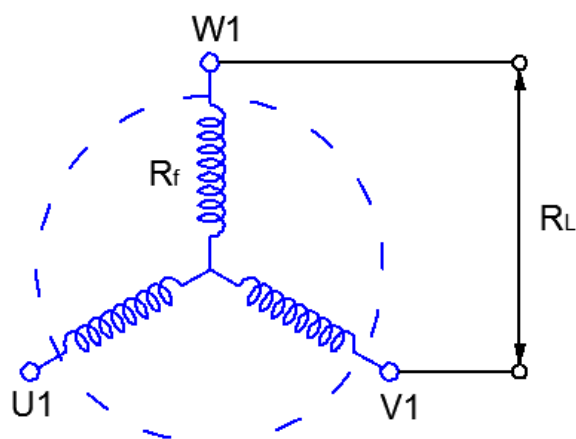


Figura 5.21- Ligação em estrela.

A resistência de linha para uma ligação em triângulo é dada pela soma das resistências de fase.

$$R_{L,1-2} = R_{f1} + R_{f2}; \quad R_{L,2-3} = R_{f2} + R_{f3}; \quad R_{L,3-1} = R_{f3} + R_{f1}; \quad R_L = \frac{\sum R_{L,j-k}}{3} \quad (24)$$

Tabela 5.18 - Resistência de linha para ligação dos enrolamentos do estator em estrela.

Terminais		U1-V1	V1-W1	W1-U1
Resistência de fase	$R_f [\Omega]$	2,159	2,191	2,191
Resistência de linha	$R_{L,j-k} [\Omega]$	4,319	4,382	4,382
Resistência de linha - Média	$R_L [\Omega]$	4,361		

5.8-Ensaio de aquecimento

O estudo do comportamento térmico de uma máquina eléctrica é um processo complexo: o facto de a máquina eléctrica ser constituída por várias partes metálicas de diferentes materiais, com diferentes capacidades térmicas, faz com que a distribuição do calor não se faça de forma homogénea. Esta questão levanta problemas a nível prático, uma vez que não será indiferente o local onde se colocam os dispositivos de aquisição de temperatura.

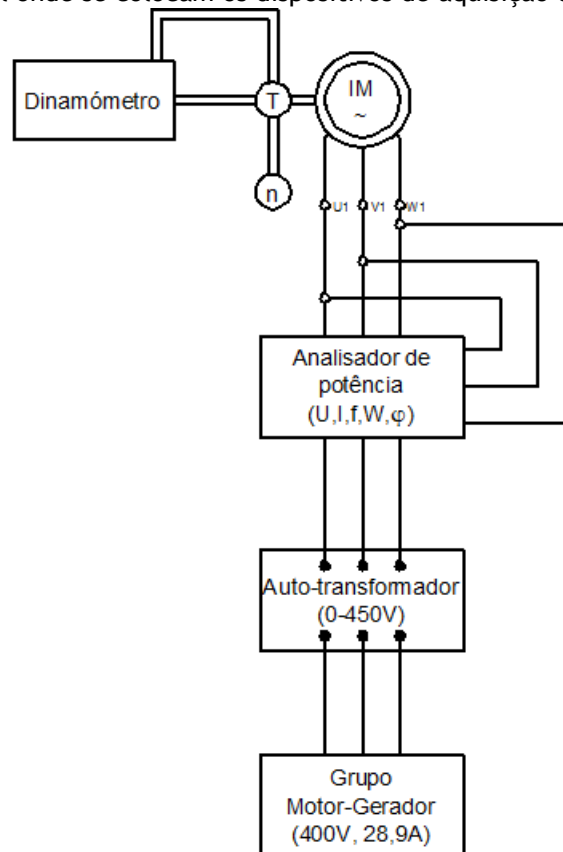


Figura 5.22 - Esquema de montagem do ensaio de aquecimento.

Assim, o estudo térmico da máquina pode ser feito de uma forma aproximada, considerando-se que a máquina é um bloco de material homogéneo. Nesta condição, pode aplicar-se a equação de equilíbrio térmico de um corpo homogéneo.

$$Q \cdot dt = A \cdot \Delta T \cdot dt + C \cdot d\Delta T \quad (25)$$

onde

Q - a quantidade de calor desenvolvido no motor (devido às perdas de energia) por unidade de tempo [W];

C - a capacidade térmica do “material” do motor, que é a quantidade de calor necessário para aumentar a temperatura do motor de 1 K, [J/K];

A - coeficiente de transmissão térmica do motor [W/K];

ΔT - aquecimento, aumento da temperatura acima da temperatura ambiente $\Delta T = T_m - T_{amb}$, [K].

Fazendo a integração da equação de equilíbrio térmico, com as condições iniciais $t = 0 \rightarrow \Delta T = \Delta T_0$, obtém-se a seguinte expressão para o aquecimento de um motor:

$$\Delta T = \Delta T_f - \left((\Delta T_f - \Delta T_0) \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \right) \quad (26)$$

Onde

ΔT é a sobre elevação da temperatura acima da temperatura ambiente;

ΔT_f é o aquecimento final da máquina $\Delta T_f = Q/A$;

τ é a constante térmica do motor $\tau = C/A$.

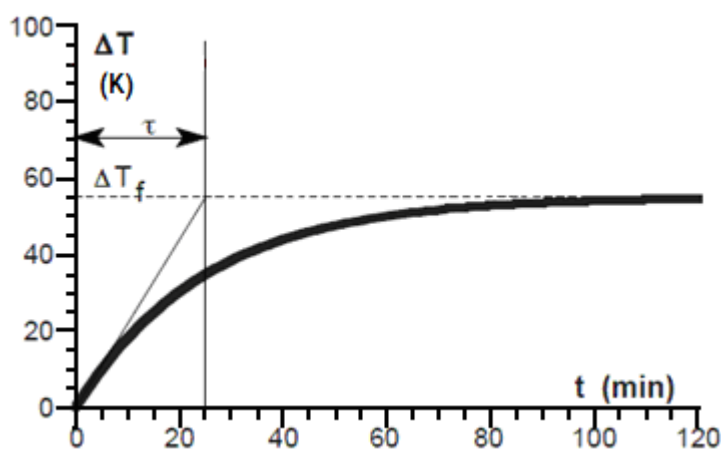


Figura 5.23 - Curva de aquecimento típico de um motor (com $\Delta T_0 = 0$).

5.8.1-Sistema de aquisição de temperatura

A escolha do local onde são instalados os sistemas de aquisição de temperatura é fundamental. Assim, foi necessário estudar o local da máquina que melhor reflectisse as variações de temperatura no motor.

Numa primeira fase do estudo, foi colocada uma sonda térmica, do tipo K, na cavidade de aperto da caixa de terminais do motor (ver figura 5.24).



Figura 5.24 - Localização da sonda térmica do tipo K.

Após a realização do ensaio por recurso a uma câmara termográfica digital, foi possível verificar que a opção inicial não seria a mais adequada para a medição da temperatura do motor: na figura 5.25 pode-se observar que a zona onde estava colocada a sonda não correspondia ao local mais quente da carcaça do motor e, como a sonda estava em contacto com a carcaça, a temperatura lida iria ser afectada. Através da imagem térmica completa do motor pôde-se confirmar que a parte anterior do motor (lado do veio de atraque), devido ao facto da ventilação se encontrar na parte posterior, era aquela que atingia temperaturas mais elevadas.

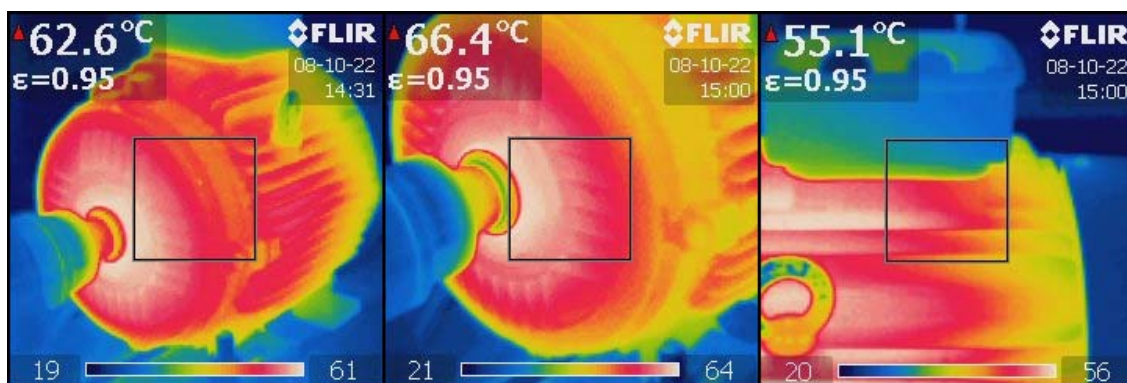


Figura 5.25 - Fotografia térmica do motor.

A solução definitiva adoptada passou por utilizar duas sondas do tipo K flexíveis, permitindo que estas se adaptassem à estrutura geométrica do motor. Uma das sondas ficou alojada por cima do ferro do estator e, a outra, no exterior da carcaça próximo do veio do motor (ver figura 5.26).

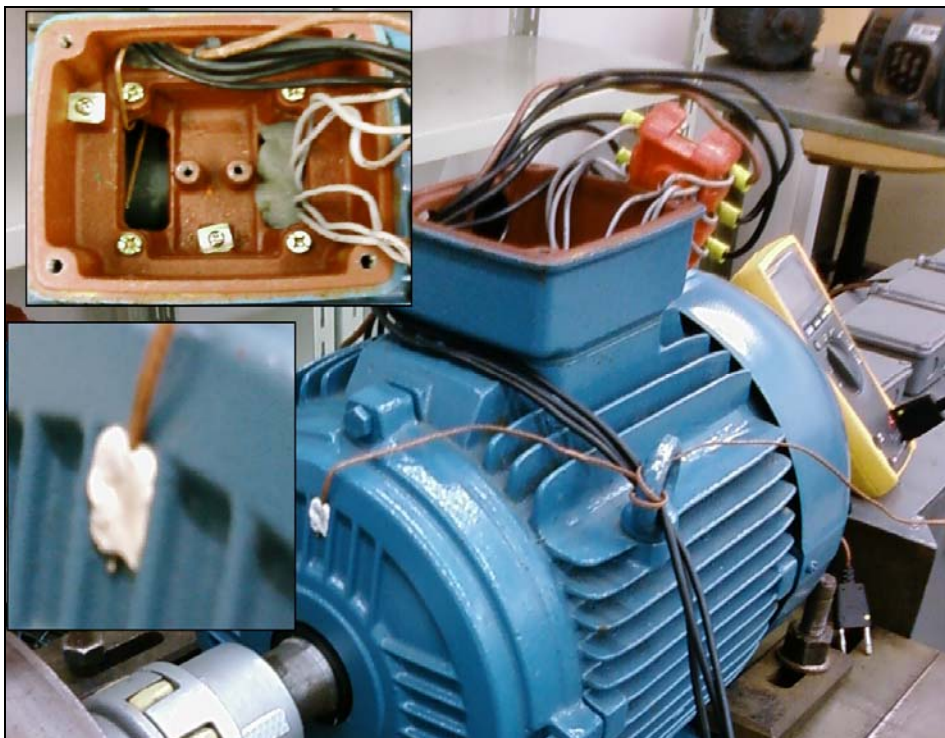


Figura 5.26 - Localização das sondas tipo K.

A utilização de duas sondas prendeu-se com o facto de se poder verificar o paralelismo entre o andamento das curvas de temperatura, no interior e no exterior do motor.

É de salientar que esta foi a solução possível e aquela que melhores garantias oferecia. É certo que hoje em dia há soluções que apresentam uma maior fidelidade, como é o caso dos sensores incorporados nos enrolamentos do estator, mas que não se encontrava ao alcance deste trabalho.

5.8.2- Procedimentos e condições de ensaio

O ensaio de aquecimento da máquina em estudo teve por objectivo a determinação da temperatura final dos enrolamentos do estator com o motor à plena carga assim como o valor da sua resistência nestas condições.



Figura 5.27 - Montagem do ensaio de aquecimento.

Como já foi referido, durante o ensaio térmico da máquina a fonte de alimentação não deverá apresentar um factor de tensão harmónica superior a 0,015 e adicionalmente, a componente de sequência negativa do sistema de tensões deverá ser inferior a 0,15% da componente de sequência positiva.

Antes de iniciar o ensaio deve ser medida a resistência do estator através de um método adequado. Neste caso utilizou-se o método do voltímetro-amperímetro.

A máquina a ensaiar deve ser colocada em funcionamento à plena carga (tensão, frequência e corrente nominais) através de um método adequado. Neste caso, foi colocada em carga através de um dinamómetro, sendo a carga monitorizada directamente através da entrada ou da saída.

Quando o tempo necessário para estabilizar a temperatura é elevado é permitido colocar a máquina em sobrecarga durante um período preliminar de aquecimento, sendo que a sobrecarga deve ser removida antes que a máquina atinja a temperatura final prevista.

Devem ser registados os valores de todas as grandezas eléctricas relevantes e todas as temperaturas, incluindo a temperatura ambiente, com intervalos de 30 minutos ou menos. O ensaio continuará até que a variação da sobre elevação de temperatura do motor seja inferior a 1K entre períodos de 30 minutos.

Depois de efectuado o ensaio de aquecimento deve ser medida a resistência do enrolamento do estator. Esta medida deve ser efectuada num intervalo de tempo o mais curto possível, após a paragem do motor. Este requisito exige um bom planeamento dos procedimentos a realizar, assim como um número de pessoas adequado para se conseguir fazer as medidas num período de tempo que permita alguma fiabilidade dos resultados.

No caso do ensaio realizado no laboratório, foi necessário efectuar os seguintes passos entre o final do ensaio e a medição da resistência do motor:

1. Em primeiro lugar foi necessário retirar carga ao motor gradualmente através da banca de ensaio;
2. Depois, foi necessário desfazer todas as ligações do motor à fonte de alimentação, de modo a não introduzir caminhos de circulação de correntes exteriores ao enrolamento do estator;
3. Em seguida, ligar os enrolamentos do estator à banca de ensaios de resistência;
4. Finalmente, efectuar a leitura, dos dados dos aparelhos de medida, nomeadamente do voltímetro e do amperímetro.

O tempo necessário para efectuar estes passos foi de três minutos, o que é muito superior aos limites que a norma IEC 60034-1 impõe (ver tabela 5.19). Dados os procedimentos prévios, atrás descritos, para medir o valor da resistência, embora seja possível baixar este tempo, adoptando sistemas que permitam uma mais rápida retirada de carga do motor assim como o isolamento dos terminais do motor da rede, é de crer que não seja possível efectuar a medida dentro do tempo estabelecido na norma.

A solução para este facto passaria por adoptar um método de sobreposição de uma pequena corrente DC de medida, sem interrupção da corrente de carga AC.

Tabela 5.19 - Intervalo de tempo.

Potência nominal de saída (P_N) [kW ou kVA]	Intervalo de tempo após o corte da alimentação [s]
$P_N \leq 50$	30
$50 < P_N \leq 200$	90
$200 < P_N \leq 5\,000$	120
$5\,000 < P_N$	Por acordo

A norma IEC 60034-1 prevê ainda que se a leitura da resistência não puder ser efectuada dentro dos limites especificados na tabela 5.17, deve ser efectuada o mais rapidamente possível, mas não ultrapassando mais de duas vezes o valor estipulado e efectuando leituras complementares, espaçadas de cerca de um minuto até decrescer significativamente do seu valor máximo.

5.8.3-Resultados do ensaio

Durante o ensaio de aquecimento, a frequência de alimentação do motor variou entre 49,88 Hz e 50,02 Hz (ver figura 5.28), o que representa um desvio máximo de 0,24% em relação à sua frequência nominal.

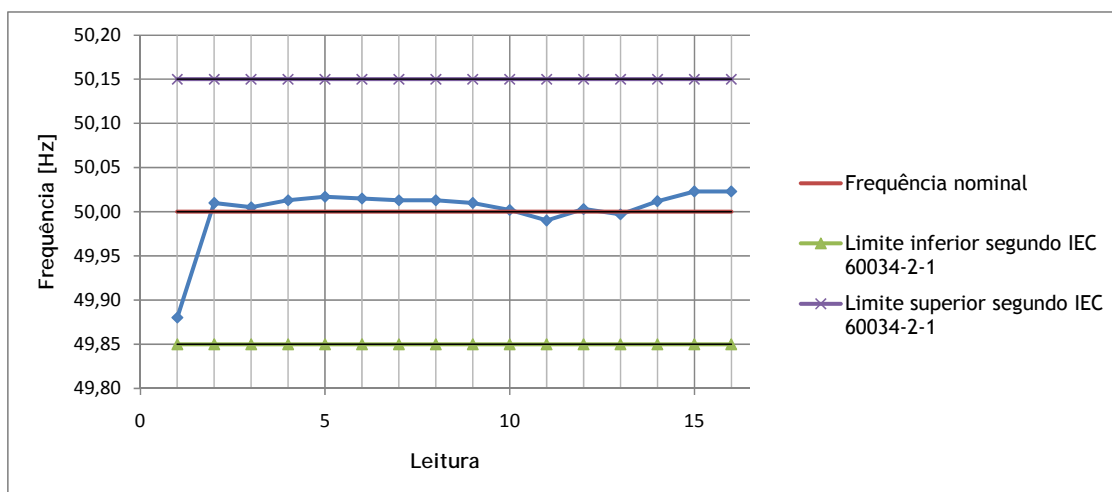


Figura 5.28 - Variação de frequência ao longo do ensaio.

Em relação ao valor eficaz da tensão de alimentação, verificou-se uma oscilação entre os 398,9 V e os 400,12 V. Esta oscilação representa um desvio máximo de 1,1 V, ou seja, 0,28% da tensão nominal do motor (ver figura 5.29).

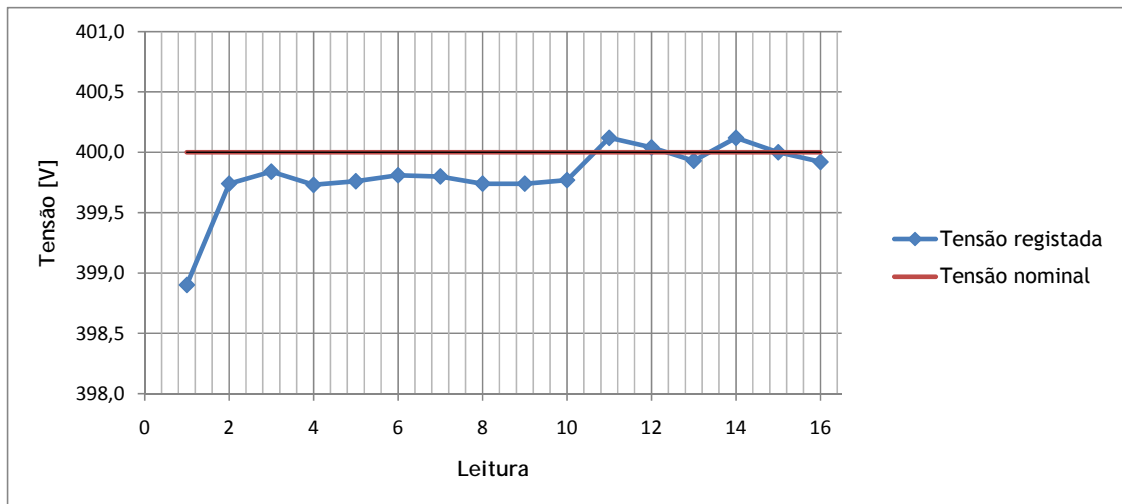


Figura 5.29 - Variação de tensão ao longo do ensaio.

A regulação do binário em carga foi o parâmetro que se verificou ser o mais problemático, uma vez que se pretendia um ajuste do valor na casa das décimas. Durante um período inicial, a máquina foi sujeita a um binário superior ao nominal (para acelerar o processo de estabilização térmica). Após o período de sobrecarga da máquina, o binário aplicado através do dinamómetro teve variações máximas compreendidas entre os -4,28% e os +2,28% do seu binário nominal (ver figura 5.30).

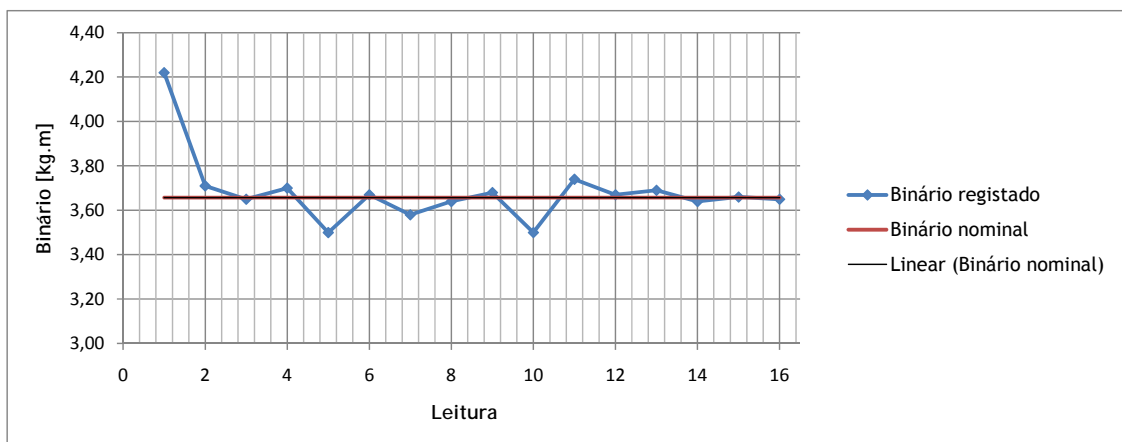


Figura 5.30 - Variação de binário ao longo do ensaio.

O ensaio térmico teve a duração de 5 horas e 30 minutos, após o qual se obteve uma temperatura final do motor de 67,1°C, a uma temperatura ambiente de 23,1°C. O motor em questão apresenta então uma sobre-elevação final da temperatura, à plena carga de 44°K.

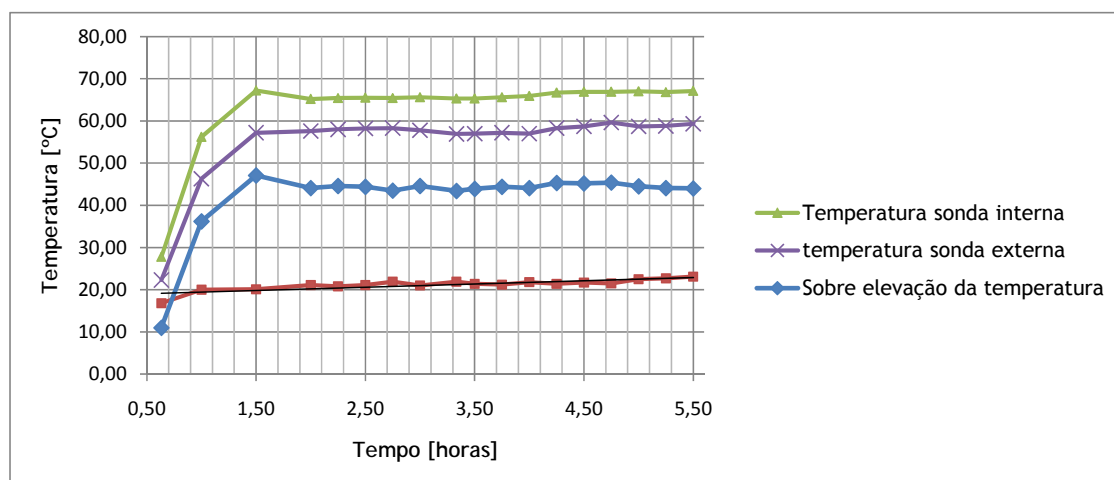


Figura 5.31 - Registo de temperatura.

Após a conclusão do ensaio de aquecimento, e como já foi referido anteriormente procedeu-se à medição da resistência dos enrolamentos do estator a quente. Na tabela 5.18 são apresentadas as leituras efectuadas e o valor da resistência entre par de terminais dos enrolamentos. Estas leituras foram efectuadas a uma temperatura ambiente de 22,8°C.

Tabela 5.20 - Resistência do estator a quente.

Terminais		U1-V1	V1-W1	W1-U1
Temperatura ambiente	T_{AMB} [°C]	22,80	22,80	22,80
Temperatura estator	T_s [°C]	66,80	66,80	66,80
Corrente no enrolamento	I_{DC} [A]	2,58	2,58	2,58
Tensão no enrolamento	V_{DC} [V]	4,57	4,52	4,56
Resistência entre par de terminais	$R_{L,j-k}$ [Ω]	1,740	1,720	1,736
Resistência entre par de terminais - Média	R_L [Ω]	1,732		
Resistência entre par de terminais por medição de temperatura	R_L [Ω]	1,734		

O valor da temperatura final do motor, obtido por medição de resistência, para a temperatura ambiente de 22,8°C, foi de 66,41°C. Este valor é muito próximo do valor obtido através da sonda no interior do motor.

5.9-Ensaio em vazio

O ensaio em vazio ou a 0% de carga consiste em colocar o motor a funcionar sem carga mecânica acoplada ao seu veio. É aplicada a tensão nominal ao estator do motor e mede-se a potência e a corrente absorvidas. A potência absorvida pelo motor vai cobrir as perdas no cobre do estator, as perdas magnéticas e as perdas mecânicas. O rotor desenvolve algum binário (perdas mecânicas), no entanto é praticamente residual o que faz com que se possa desprezar. Assim, o circuito equivalente por fase do motor é o seguinte:

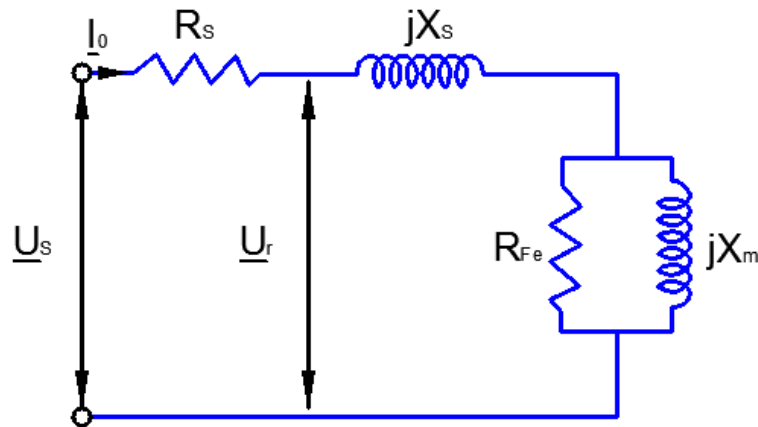


Figura 5.32 - Circuito equivalente do motor em vazio.

No caso de se pretender separar as parcelas das perdas no ferro e das perdas mecânicas, é necessário efectuar o chamado ensaio em vazio a tensão variável. Esta variante consiste em alimentar o motor com uma tensão variável de frequência nominal, e ajustar a tensão, no sentido decrescente, para um mínimo de sete pontos de ensaio entre os 125% e 20% da tensão nominal, incluindo a tensão nominal do motor.

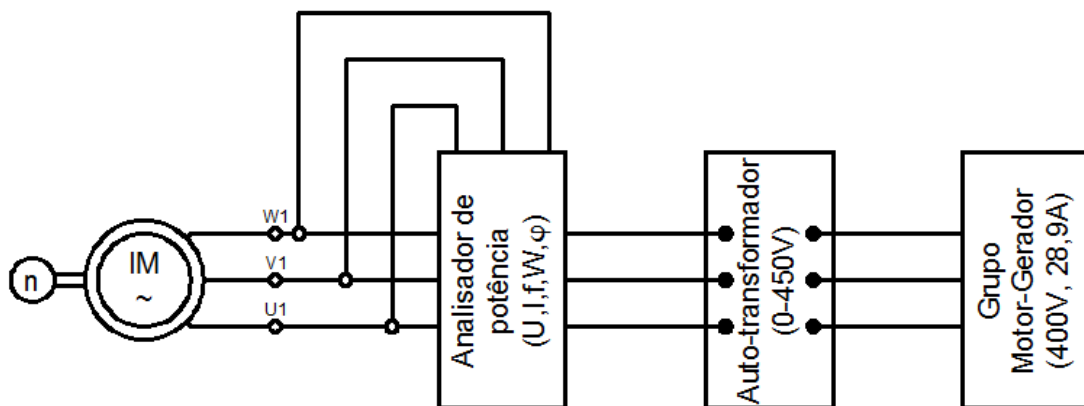


Figura 5.33 - Esquema de montagem do ensaio em vazio

A norma IEC 60034-2-1 estipula um mínimo quatro pontos igualmente espaçados entre 125% e 60% da tensão nominal e três pontos de ensaio, igualmente espaçados, entre 50% e 20% da tensão nominal, ou até que a corrente não decresça.

Para cada ponto de ensaio são medidos os valores de potência, corrente e tensão a partir dos quais se deduzem as perdas constantes, de acordo com a equação:

$$P_k = P_{Fe} + P_m = P_0 - P_s = P_0 - 1,5 \cdot R_L \cdot I_0^2 \quad (27)$$

onde

P_k - são as perdas constantes, em W;

P_{Fe} - são as perdas magnéticas ou no ferro, em W;

P_m - são as perdas mecânicas ou de atrito e ventilação, em W;

P_0 - é a potência absorvida em vazio pelo motor, em W;

R_L - é a resistência de linha, em Ω ;

I_0 - é a corrente de vazio, em A.

Representando as perdas constantes sob a forma gráfica em função da tensão, obtêm-se uma curva do tipo parabólico. Efectuando uma regressão da curva até interceptar o eixo das ordenadas, obtêm-se as perdas mecânicas, isto porque as perdas magnéticas são dependentes do fluxo, que por sua vez é praticamente nulo na ausência de tensão (ver figura 5.34).

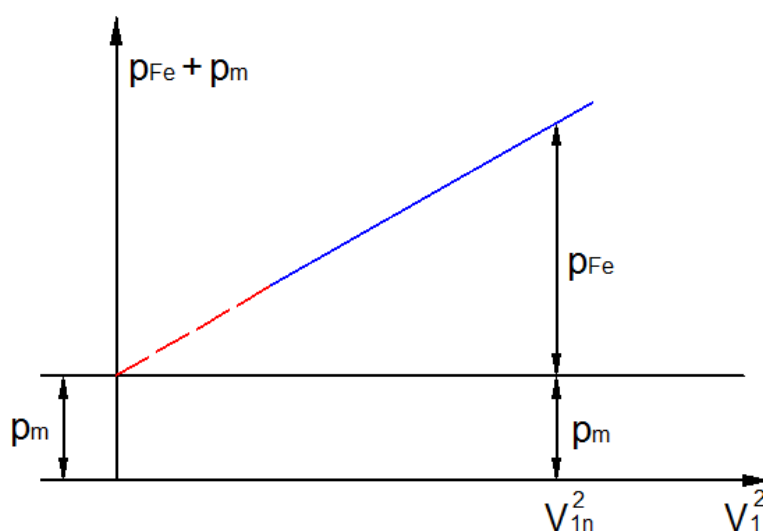


Figura 5.34 - Distribuição das perdas em função da tensão.

Como as perdas do ferro variam com o $(\omega_1 \Psi_1)^2$, que é aproximadamente V_1^2 , faz-se uma regressão linear a partir da representação gráfica das perdas em função do quadrado da tensão. Assim, reduzem-se os erros aleatórios das medidas.

As perdas no ferro são obtidas a partir da curva de perdas no ferro para valores de tensão compreendidos entre 60% e 125% da tensão nominal. As perdas no ferro, para o ponto de carga desejado, são obtidas a partir dessa curva para uma tensão U_r calculada a partir da expressão:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \cdot \cos \varphi \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R_L \cdot \sin \varphi \right)^2} \quad (28)$$

onde

$$\cos \varphi = \frac{P_{el}}{\sqrt{3} \times U \times I};$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$$

Os valores de U , P_{el} e R_L são obtidos a partir do ensaio em carga.

5.9.1-Resultados

Na tabela 5.21 podem observar-se as leituras efectuadas durante o ensaio em vazio.

Tabela 5.21 - Registo de medidas do ensaio em vazio.

Ponto de ensaio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pontos (U) [V]	450	425	400	375	350	300	240	200	140	80
Temperatura do estator [°C]	62,1	62,3	61,9	61,3	60,6	59,8	58,8	57,7	56,5	55,2
Temperatura ambiente [°C]	22,2	21,8	21	20,8	20,4	20,4	21	20,8	20,8	20,6
Tensão em vazio [V]	451,5	426,7	400,3	375,8	349,0	299,6	241,1	202,0	139,7	79,7
Corrente em vazio [A]	6,30	5,31	4,59	4,12	3,71	3,10	2,59	2,04	1,43	0,89
Potência em vazio [W]	385,7	293,3	235,1	200,4	173,6	133,5	101,5	83,2	56,0	40,0
Velocidade de rotação [rpm]	1499,1	1499,2	1499,6	1498,3	1496,8	1497,3	1497,6	1497,3	1496,9	1494,4
Factor de potência - $\cos\phi$	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,12	0,16	0,33
Frequência da rede [Hz]	49,98	50,00	50,01	49,95	49,91	49,92	49,93	49,93	49,94	49,94

Na figura 5.35 estão representadas as curvas de corrente, potência, factor de potência e deslizamento.

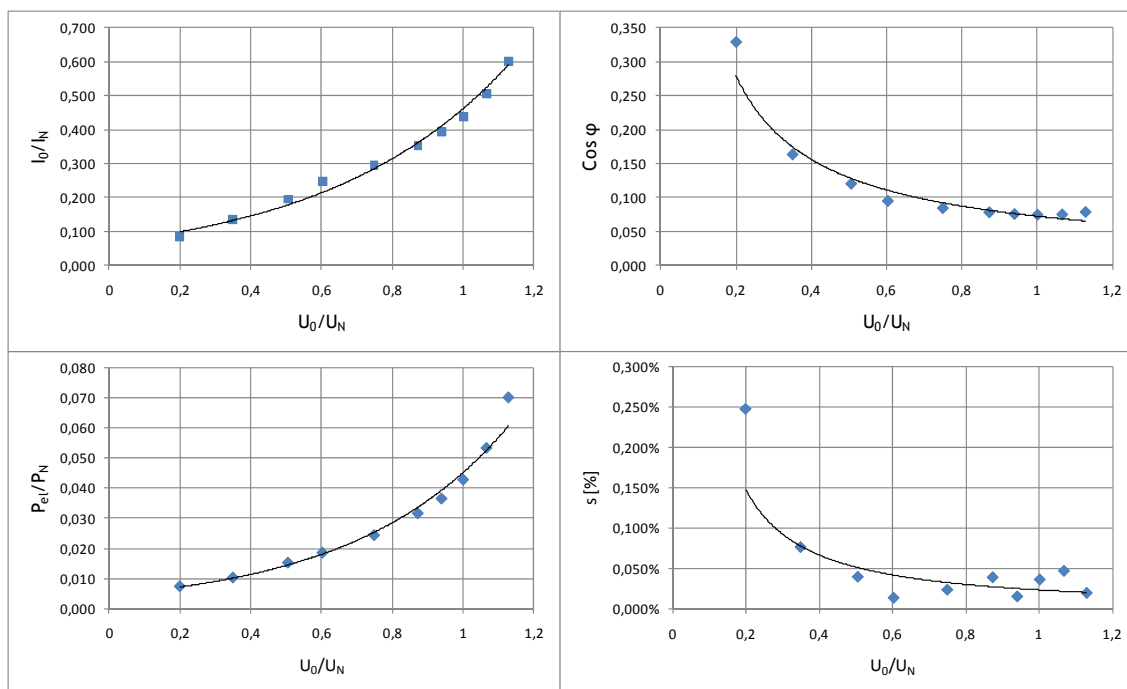


Figura 5.35 - Curvas de ensaio.

5.9.1.1-Determinação das perdas mecânicas

Na figura 5.36 encontra-se o gráfico de extrapolação das perdas mecânicas

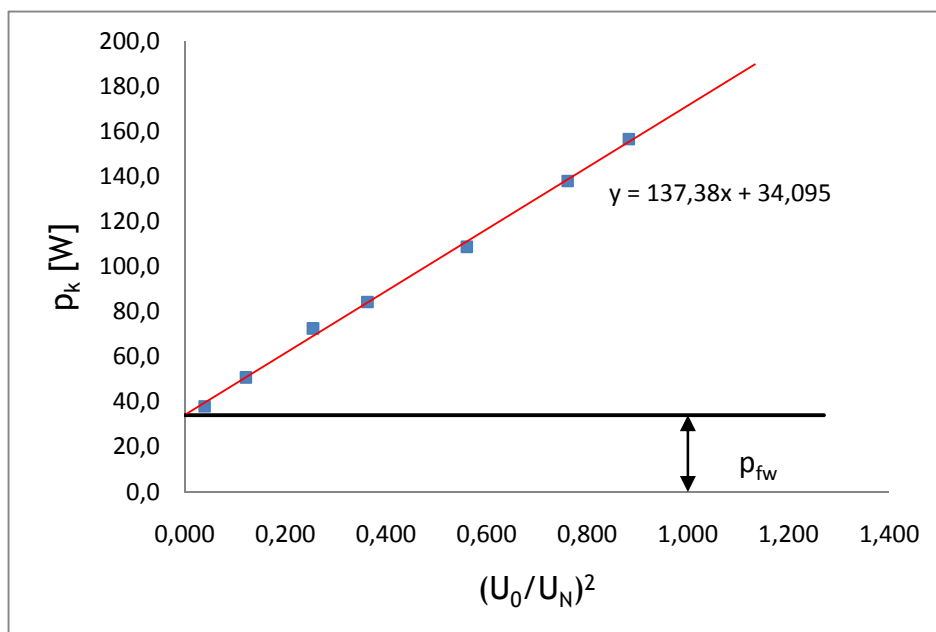


Figura 5.36 - Extrapolação das perdas mecânicas.

5.9.1.2-Determinação das perdas magnéticas

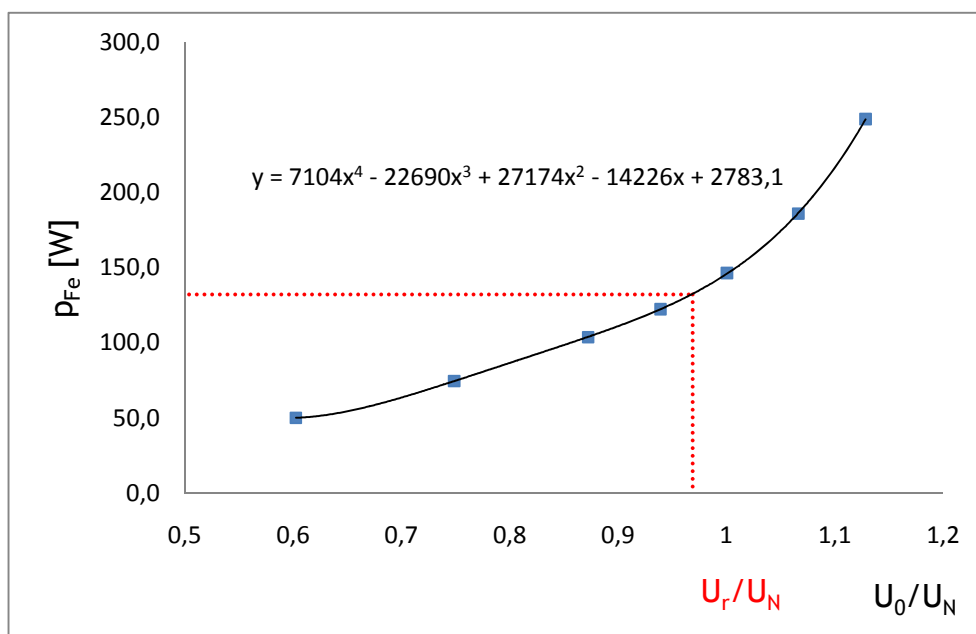


Figura 5.37 - Determinação gráfica das perdas no ferro.

5.9.2-Conclusões

Dado que o ensaio se realizou seguidamente ao ensaio de aquecimento, o motor encontrava-se próximo da sua temperatura nominal e garantiu-se também que as perdas mecânicas estavam estabilizadas.

Nestas condições, apuraram-se os seguintes resultados finais:

- $p_{mec}=34 \text{ W}$;
- $p_{Fe}=132 \text{ W}$ (com U_N , f_N).

5.10-Ensaio em carga

O ensaio em carga teve como objectivo a determinação das perdas nos enrolamentos do estator e do rotor.

A máquina é acoplada a um sistema de carga, no caso presente a um dinamómetro, e é submetida a diferentes regimes de carga, entre 25% e 150% da carga nominal. O ensaio é efectuado de forma decrescente, ou seja, ajustando começando pelo ponto mais elevado até ao mais baixo. A norma IEC 60034-2-1 recomenda um mínimo de seis pontos de ensaio, situando-se quatro pontos entre 25% e 100% da carga nominal e dois pontos entre 100% e 150%.

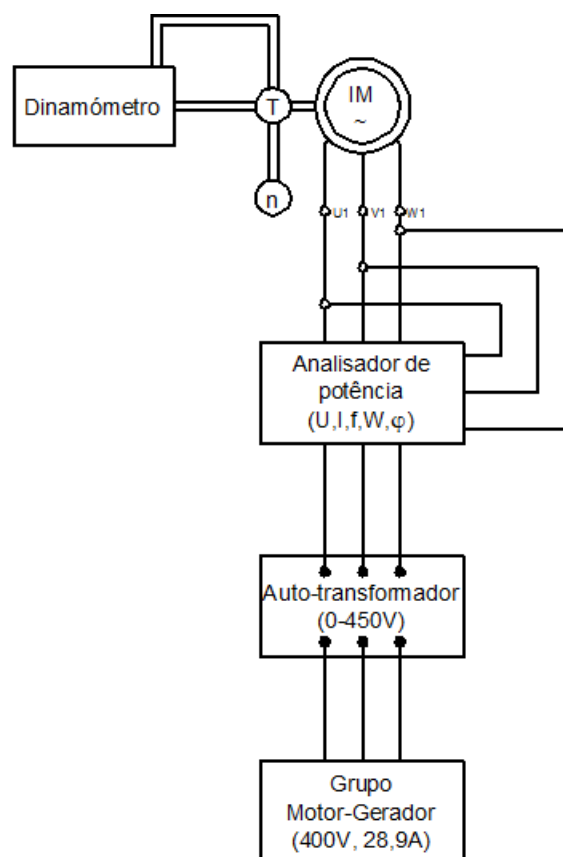


Figura 5.38- Esquema de montagem do ensaio em carga.

Antes de se iniciar o ensaio em carga, a máquina foi colocada em funcionamento de forma a atingir a temperatura nominal de funcionamento à plena carga.

5.10.1-Determinação das perdas por efeito de Joule no enrolamento do estator

As perdas por efeito de Joule no enrolamento do estator para cada ponto de ensaio são calculadas a partir da seguinte equação:

$$p_s = 1,5 \times I^2 \times R \quad (29)$$

onde

p_s - são as perdas por efeito de Joule no estator, em W;

I - é a corrente no estator, em A;

R - é a resistência do enrolamento, em Ω .

As perdas determinadas devem ainda ser corrigidas para uma temperatura de referência, correspondente a $T_{Amb}=25^\circ\text{C}$.

5.10.2-Determinação das perdas por efeito de Joule no enrolamento do rotor

As perdas por efeito de Joule no enrolamento do rotor, para cada ponto de ensaio, são calculadas a partir da seguinte equação:

$$p_r = (P_{el} - p_s - p_{Fe}) \times s \quad (30)$$

onde

p_r - são as perdas por efeito de Joule no rotor, em W;

P_{el} - é a potência de entrada do motor, em W;

p_s - são as perdas por efeito de Joule no estator corrigidas, em W;

p_{Fe} - são as perdas no ferro, em W;

s - é o deslizamento.

O deslizamento deve ser corrigido para uma temperatura de refrigeração de referência de 25°C , através da equação:

$$s_b = \frac{s_a \cdot (t_b + k1)}{t_a + k1} \quad (31)$$

Onde

s_a - é o valor do deslizamento conhecido, à temperatura t_a ;

s_b - é o valor corrigido do deslizamento, para a temperatura t_b ;

t_a - é o valor da temperatura, em $^\circ\text{C}$, quando o deslizamento s_a foi medido (18°C);

t_b - é o valor da temperatura, em $^\circ\text{C}$, para a qual o deslizamento deve ser corrigido (25°C);

$k1$ - é igual a 235 (condutores em cobre).

5.10.3-Resultados do ensaio

Na tabela 5.22 podem observar-se as leituras efectuadas o ensaio em carga.

Tabela 5.22 - Registo de medidas do ensaio em carga.

Binário	T [kg.m]	4,80	4,26	3,67	2,61	1,80	0,78
Tensão	U [V]	399,51	399,79	400,10	400,01	400,28	400,14
Corrente	I [A]	13,38	11,99	10,50	8,13	6,45	5,02
Potência de entrada	P _{el} [W]	8180,00	7110,00	6150,00	4401,00	3060,00	1408,00
Factor de potência	cos φ	0,880	0,860	0,846	0,783	0,682	0,401
Frequência	f [Hz]	49,97	50,09	50,00	49,98	50,03	50,09
Velocidade	n [r.p.m.]	1454,10	1463,00	1467,00	1475,40	1485,50	1497,80
Perdas por efeito de Joule no estator	p _s [W]	429,21	345,72	264,81	158,98	100,00	60,65
Perdas por efeito de Joule no rotor	p _r [W]	249,98	191,58	138,49	72,05	31,99	4,35

Na figura 5.39 estão representadas as curvas de ensaio obtidas através do ensaio em carga.

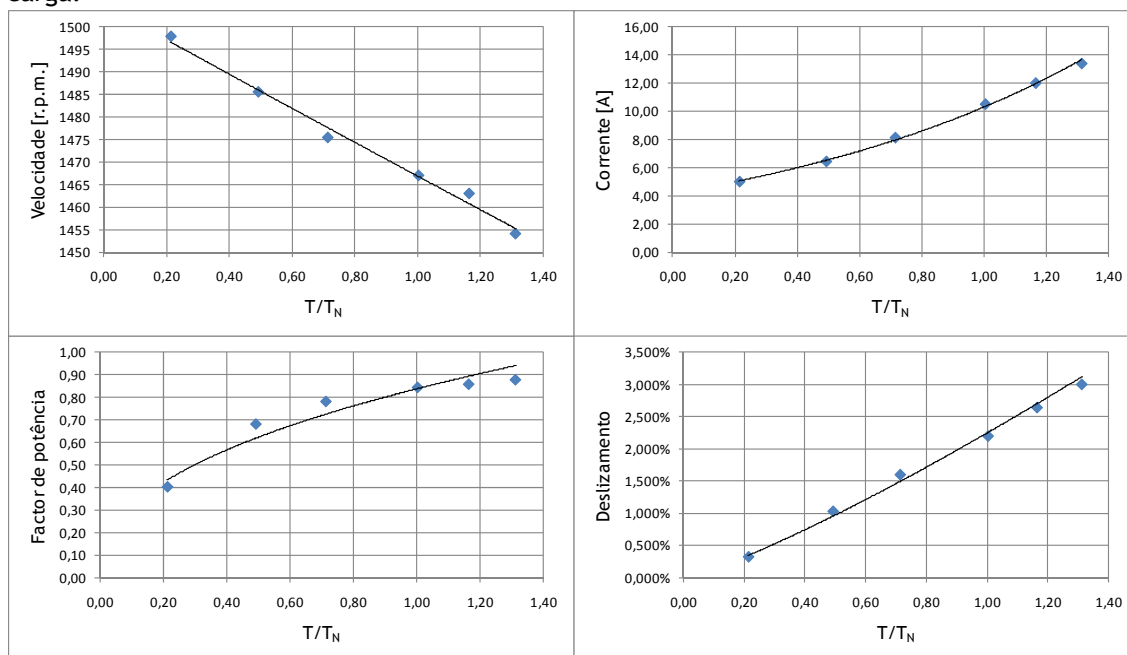


Figura 5.39 - Curvas de ensaio em carga.

5.10.4-Conclusões

A principal dificuldade em executar este ensaio prendeu-se com o facto de não ser possível, com os meios disponíveis, fazer uma leitura do binário com a precisão que exige a norma IEC 60034-2-1. Através de algumas leituras efectuadas na banca de ensaio, foi possível verificar, apesar de forma pouco rigorosa, que a oscilação no ponteiro da balança variava entre 0,04 e 0,07 kg.m, o que corresponde a uma precisão máxima de 0,44%.

Através deste ensaio, foi possível apurar os seguintes valores de perdas por efeito de Joule nos enrolamentos do estator e na gaiola rotórica:

- $p_s = 265$ W;
- $p_r = 139$ W (com U_N , f_N , T_N).

5.11-Ensaio Eh-star

5.11.1-Determinação da resistência R'eh

O motor ensaiado possui a ligação dos enrolamentos do estator em triângulo pelo que a resistência inicial de ensaio R'_{eh} , toma o seguinte valor:

$$R'_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \cdot 0,2 = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 10,4} = 13,32 \Omega$$

5.11.2-Determinação da corrente e da tensão de teste

Corrente de teste:

$$I_t = \frac{\sqrt{I_N^2 - I_0^2}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{10,4^2 - 4,59^2}}{\sqrt{3}} = 5,45A$$

Tensão de teste:

$$U_t = U_N \cdot \sqrt{3} = 400 \cdot \sqrt{3} = 692,82V$$

5.11.3-Determinação da resistência de teste R_{vw}

A resistência R_{vw} para os pontos de ensaio correspondentes a correntes de teste (I_v) superiores a 100% da corrente nominal de teste, I_{tN} , deve ser determinada a partir de uma função linear da corrente de teste.

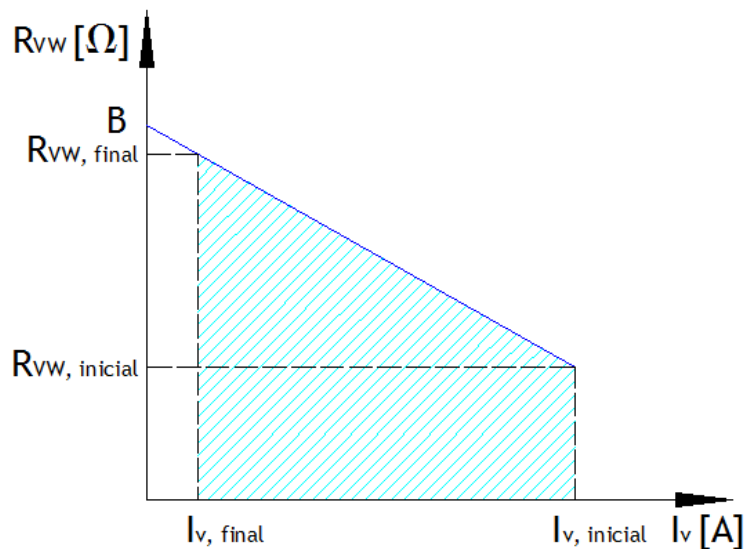


Figura 5.40 - Linearização da resistência R_{vw} .

A resistência para cada ponto de ensaio é dada pela seguinte expressão:

$$R_{vw} = A \times I_v + B \quad (32)$$

Onde:

$$A = \frac{R_{VW,final} - R_{VW,inicial}}{I_{V,final} - I_{V,inicial}};$$

$$B = \left(\frac{R_{VW,final} + R_{VW,inicial}}{2} \right) - A \cdot \left(\frac{I_{V,final} + I_{V,inicial}}{2} \right).$$

Para os pontos de ensaio correspondentes a uma corrente de teste inferior a 100% da corrente nominal de teste, a resistência R_{VW} é igual à resistência medida no final do ensaio, $R_{VW,final}$.

Na figura 5.41 pode-se observar graficamente como se obtém o valor da resistência R_{VW} para cada ponto de ensaio. Entre o valor de corrente de teste final e o valor da corrente de teste correspondente a 100% da corrente nominal de teste o valor da resistência é constante e igual ao valor de R_{VW} medido no final do ensaio. Para valores de corrente de teste superiores a 100% da corrente nominal de teste, o valor de R_{VW} é obtido através da equação 32.

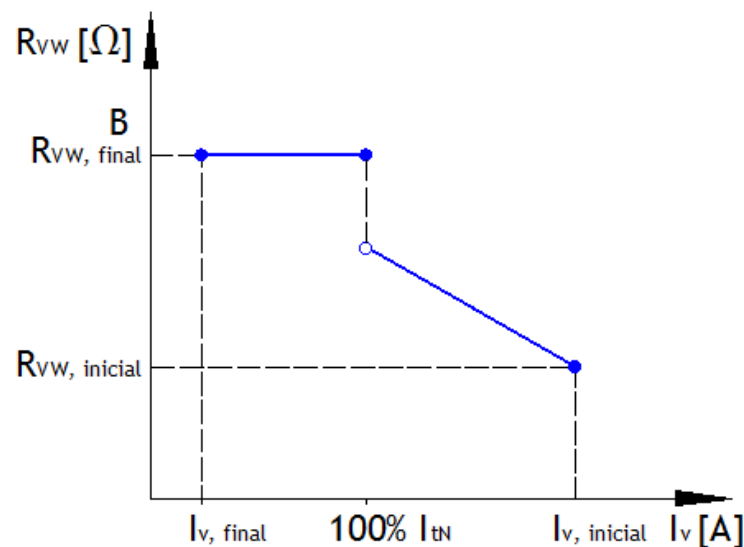


Figura 5.41 - Resistência R_{VW} em função da corrente de teste.

5.11.4-Registo de medidas

O procedimento de ensaio seguido para a realização do ensaio Eh-star foi o prescrito no capítulo anterior. Na figura 5.42 pode-se ver a montagem efectuada no LME1 para a realização deste ensaio.



Figura 5.42 - Montagem em laboratório do ensaio Eh-star.

Em primeiro lugar foi feito o arranque do motor com funcionamento simétrico e deixou-se estabilizar as perdas.

Depois de estabilizadas as perdas desligou-se o motor e fez-se a medição da resistência R_{VV} através do método do voltímetro-amperímetro.

Fizeram-se, rapidamente, as ligações necessárias para a montagem Eh-star e fez-se o arranque do motor. Já que se trata de um motor de baixa potência, não foi necessário usar o comutador S, descrito na figura 4.1 do capítulo anterior.

Feito o arranque do motor, ajustou-se a tensão para cada ponto de ensaio, começando do ponto em que a corrente é maior, de forma a obter a corrente especificada para cada ponto.

Para cada ponto mediu-se I_U , I_V , I_W , U_{UV} , U_{VW} , U_{WU} , $P_{el} = P_{UV} + P_{VW}$, a velocidade de rotação, a temperatura estatórica do motor e a temperatura ambiente.

No final das medições, desligou-se o motor e mediu-se novamente a resistência do estator entre as fases V e W.

Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Eh-star - análise crítica

A tabela 5.23 mostra os valores registados para o ensaio efectuado.

Tabela 5.23 - Registo de medidas do ensaio Eh-star.

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
Resistência de Teste	$R_{eh} [\Omega]$	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50
Corrente de Fase	$I_U [A]$	6,88	6,08	5,27	4,57	3,99	3,38
Corrente de Fase	$I_V [A]$	8,14	7,20	6,23	5,39	4,71	3,99
Corrente de Fase	$I_W [A]$	5,96	5,23	4,50	3,86	3,33	2,77
Tensão Composta	$U_{UV} [V]$	253,20	229,00	203,30	180,50	161,80	141,90
Tensão Composta	$U_{VW} [V]$	281,90	254,80	226,00	200,50	179,70	157,30
Tensão Composta	$U_{WU} [V]$	72,80	63,90	55,10	47,20	40,80	33,90
Potência de Entrada	$P_{el} [W]$	898,00	717,00	546,00	414,00	322,00	236,80
Frequência	$f [Hz]$	50,02	50,05	49,97	49,99	50,00	50,01
Velocidade	$n [r.p.m.]$	1480,60	1480,80	1478,20	1478,40	1478,30	1478,80
Deslizamento	s	0,0133	0,0138	0,0139	0,0142	0,0145	0,0144
Temperatura Ambiente	$T_{AMB} [^{\circ}C]$	18,90	19,10	19,20	19,20	19,30	19,40
Temperatura Estator	$T_s [^{\circ}C]$	24,00	26,60	28,50	29,90	30,70	31,00

5.11.5-Resultados

Para o tratamento computacional dos valores registados durante o ensaio, foi elaborada uma folha de cálculo, em formato Excel, onde são introduzidas as variáveis de entrada (valores registados durante o ensaio) e são apresentados como valores de saída, as componentes de sequência positiva e negativa das tensões e correntes internas, componentes de sequência positiva e negativa da potência no entreferro e as perdas adicionais em carga (ver figura 5.43).

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Método Eh-Star							
Dados do Motor							
Fabricante:	WEG	Grau de protecção:	IP55				
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1	Tamanho:	132S				
Tipo de motor:	IEC Design N	Tensão Nominal:	400				
Número de Série:	20APR04BM53734	Tipo de aplicação do motor:	S1				
Potência (kW):	5,5	Classe de Isolamento:	F				
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500	Temperatura Ambiente (°C)	40				
Velocidade à plena carga (RPM):	1465	Ligação dos enrolamentos:	Triângulo				
Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
	%I _{th}	1,50	1,33	1,17	1,00	0,88	0,75
Corrente de Referência	I _{ref} [A]	8,18	7,27	6,36	5,45	4,77	4,09
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal	I _N [A]	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Corrente em Vazio	I ₀ [A]	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4
Perdas no Ferro	P _{Fe} [W]	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Perdas Mecânicas	P _{fw} [W]	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10
Tensão Nominal por Fase	U _{N,Ph} [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal por Fase	I _{N,Ph} [A]	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Impedância Nominal por Fase	Z _N [Ω]	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98
Tensão Nominal de Teste	U _t [V]	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82
Corrente Nominal de Teste	I _t [A]	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Resistência de Teste	R _{eh} [Ω]	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50
Corrente de Fase	I _U [A]	6,88	6,08	5,27	4,57	3,99	3,38
Corrente de Fase	I _V [A]	8,14	7,20	6,23	5,39	4,71	3,99
Corrente de Fase	I _W [A]	5,96	5,23	4,50	3,86	3,33	2,77
Tensão Composta	U _{UV} [V]	253,20	229,00	203,30	180,50	161,80	141,90
Tensão Composta	U _{VW} [V]	281,90	254,80	226,00	200,50	179,70	157,30
Tensão Composta	U _{WU} [V]	72,80	63,90	55,10	47,20	40,80	33,90
Potência de Entrada	P _{el} [W]	898,00	717,00	546,00	414,00	322,00	236,80
Frequência	f [Hz]	50,02	50,05	49,97	49,99	50,00	50,01
Velocidade	n [r.p.m.]	1480,60	1480,80	1478,20	1478,40	1478,30	1478,80
Deslizamento	s	0,0133	0,0138	0,0139	0,0142	0,0145	0,0144
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	18,90	19,10	19,20	19,20	19,30	19,40
Temperatura Estator	T _S [°C]	24,00	26,60	28,50	29,90	30,70	31,00
Variação de temperatura	ΔT [°C]	5,10	7,50	9,30	10,70	11,40	11,60
Resistência de Fase @ 25°C	R _{f,25°C} [Ω]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Resistência entre par de terminais @ 25°C	R _{VW,25°C} [Ω]	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482
Resistência entre par de terminais @ temperatura	R _{VW} [Ω]	4,570	4,611	4,642	4,666	4,678	4,682
Resistência entre par de terminais @ início	R _{VW,inicio} [Ω]	4,570	-	-	-	-	-
Resistência entre par de terminais @ final	R _{VW,final} [Ω]	-	-	-	-	-	4,682
Resistência entre par de terminais @ teste	R _{VW,ensaio} [Ω]	4,570	4,611	4,642	4,666	4,678	4,682
Resistência no Ferro	R _{Fe} [Ω]	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63
Componente Directa da Tensão	U _{d(1)} [V]	59,149-87,548i	52,827-78,91i	46,357-69,841i	40,566-61,78i	35,817-55,183i	30,804-48,081i
Componente Inversa da Tensão	U _{d(2)} [V]	2,947+65,277i	3,428+59,729i	3,746+53,613i	4,052+48,255i	4,315+43,843i	4,669+39,06i
Componente Directa da Corrente	I _{s,1} [A]	-0,035-1,266i	-0,035-1,145i	-0,034-1,002i	-0,032-0,882i	-0,032-0,794i	-0,031-0,701i
Componente Inversa da Corrente	I _{s,2} [A]	6,882+0,802i	6,077+0,62i	5,26+0,448i	4,55+0,286i	3,962+0,171i	3,338+0,052i
Rácio entre Componentes Directa e Inversa	I _{s,1} /I _{s,2}	0,183	0,188	0,190	0,194	0,200	0,210
	(I _{s,2} /I _t) ²	1,61	1,25	0,94	0,70	0,53	0,37
Componente Directa da Potência no Entreferro	P _{d(1)} [W]	326,297	265,509	205,214	159,576	128,007	98,250
Componente Inversa da Potência no Entreferro	P _{d(2)} [W]	217,900	173,592	131,168	96,713	73,780	52,849
Potência de Entrada de Controlo	P _{cont} [W]	891,08	709,79	539,15	408,02	317,20	233,54
Perdas Adicionais	P _{ad} [W]	69,398	53,475	36,376	25,636	17,283	8,760
Perdas Adicionais @ I _t	Intersecção B	-8,961	Declive A	48,946		Fact. Correlação	0,9995
Perdas Adicionais Corrigidas	P _{ad} [W]	79,000	61,406	45,862	34,204	25,881	18,341

Figura 5.43 - Folha de cálculo do ensaio Eh-star.

Determinação das perdas adicionais em carga de motores de indução trifásicos por recurso ao ensaio Eh-star - análise crítica

Na tabela 5.24 são apresentados os valores apurados no ensaio Eh-star. Os resultados detalhados encontram-se no anexo E, tabela E-1.

Tabela 5.24 - Resultados do ensaio Eh-star.

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
Rácio entre Componente Directa e Inversa	$I_{s,1}/I_{s,2}$	0,183	0,188	0,190	0,194	0,200	0,210
Componente Directa da Potência no Entreferro	$P_{\delta(1)}$ [W]	326,297	265,509	205,214	159,576	128,01	98,250
Componente Inversa da Potência no Entreferro	$P_{\delta(2)}$ [W]	217,900	173,592	131,168	96,713	73,780	52,849
Potência de Entrada de Controlo	P_{cont} [W]	891,08	709,79	539,15	408,02	317,20	233,54
Perdas Adicionais	P_{ad} [W]	69,398	53,475	36,376	25,636	17,283	8,760
Perdas Adicionais @ I_t	Intersecção B	-8,961	Declive A	48,946	Fact. Correlação	0,9995	
Perdas Adicionais Corrigidas	P_{ad} [W]	79,000	61,406	45,862	34,204	25,881	18,341

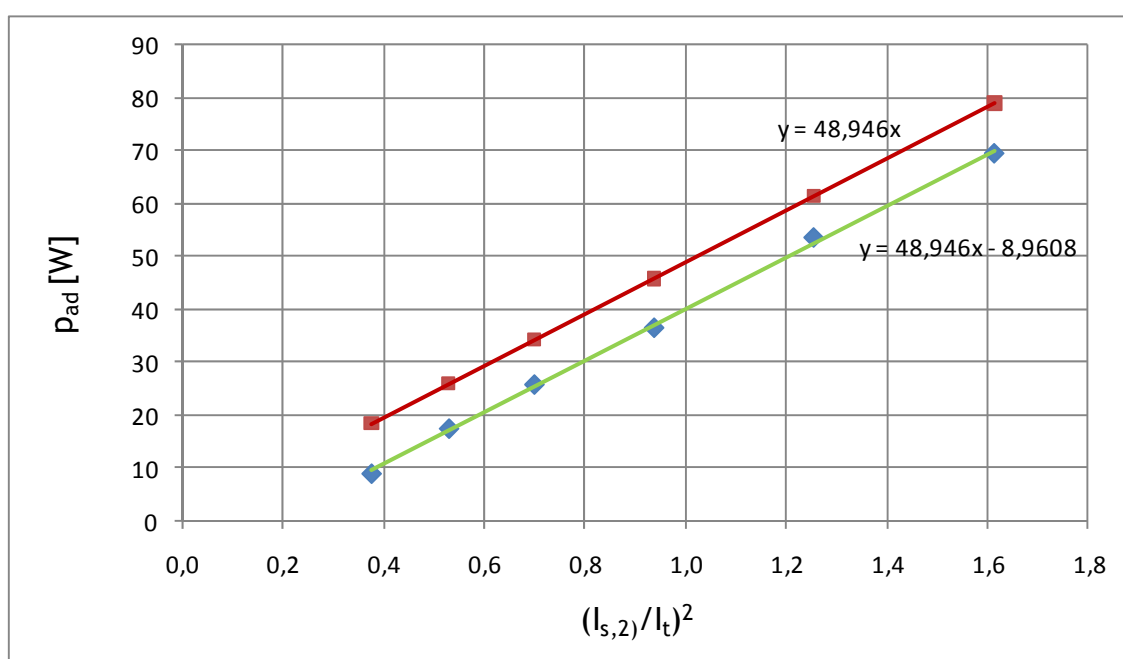


Figura 5.44 - Regressão linear para determinação das perdas adicionais.

5.12-Análise de resultados

Através do método Eh-star foi possível apurar como valor de perdas adicionais para o motor ensaiado o valor de 49W.

No método de imputação prévia de perdas (adicionais em carga) da actual norma IEC 60034-2-1, para motores com potências nominais entre 1 kW e 10 MW, as perdas adicionais em carga são dadas pela seguinte expressão:

$$P_{ad} = P_{el} \times \left[0,025 - 0,005 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{mec}}{1 \text{ kW}} \right) \right] \quad (33)$$

No caso do motor em análise, obtêm-se as seguintes perdas adicionais em carga:

$$p_{ad} = 6150 \times \left[0,025 - 0,005 \cdot \log_{10} \left(\frac{5500}{1000} \right) \right] = 131 \text{ W}$$

Na norma IEC 60034-2 (1972), que precedeu a actual, as perdas adicionais eram consideradas constantes para todas as gamas de potência e iguais a 0,5% da potência absorvida pelo motor. Seguindo esta norma obtêm-se:

$$p_{ad} = 6150 \times 0,005 = 31 \text{ W}$$

Através da análise dos resultados obtidos pode-se comprovar que as perdas adicionais em carga, para o motor em estudo, são superiores ao estipulado na antiga norma IEC60034-2 ($p_{ad}=31\text{W}$). Por outro lado são mais baixas do que aquelas obtidas pelo método de imputação prévia de perdas (adicionais em carga) da nova IEC60034-2-1 ($p_{ad}=49\text{W}$).

As perdas adicionais em carga obtidas através do método Eh-star são próximas das obtidas pelo método de atribuição de perdas da antiga IEC 60034-2 (1972). A diferença é de 37,24% mas representa apenas uma variação de 2,95% no total das perdas.

Após a realização dos ensaios descritos neste capítulo, apuraram-se os seguintes valores das parcelas de perdas do motor ensaiado:

Perdas no ferro (p_{Fe})	132,14 W
Perdas por efeito de Joule no estator (p_s)	264,81 W
Perdas por efeito de Joule no rotor (p_r)	138,49 W
Perdas mecânicas (p_{fw})	34,10 W
Perdas adicionais em carga (p_{ad})	48,95 W

Assim, para o motor ensaiado no LME1 obteve-se o seguinte rendimento eléctrico:

$$\eta = \frac{6150 - 618,48}{6150} = 89,9\%$$

Por outro lado, o valor de rendimento nominal dado pelo fabricante para este tipo de motor é de 90,1%.

5.12.1-Influência da temperatura nas perdas adicionais em carga

Realizaram-se vários ensaios em que se pretendeu analisar qual o comportamento das perdas adicionais em carga com a variação da temperatura do motor. Para tal, repetiu-se o mesmo ensaio cinco vezes, sem deixar que o motor voltasse ao ponto inicial de ensaio. Os resultados detalhados encontram-se no anexo F, tabelas F-1 a F-5. Pode-se verificar que a temperatura à qual é realizado o ensaio tem influência nas perdas adicionais. Analisando a figura 5.45 verifica-se que para uma variação da temperatura do motor de 33°C tem-se uma variação das perdas adicionais de 13,8% o que significa um aumento de cerca de 0,5%/K de variação desta temperatura.

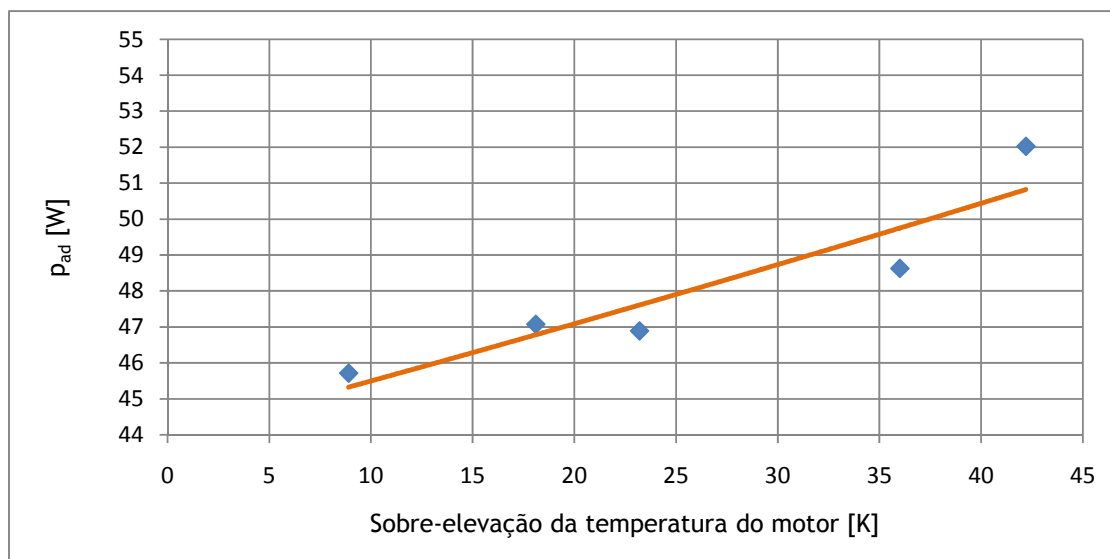


Figura 5.45 - Variação das perdas adicionais com a temperatura.

5.12.2-Influência da resistência R_{eh} nas perdas adicionais em carga

A variação da resistência R_{eh} não tem grande influência nas perdas adicionais em carga. Tal foi verificado por 5 ensaios, em que se tentou recriar as mesmas condições de sobre-elevação da temperatura do motor, fazendo variar apenas o valor da resistência R_{eh} . Os resultados detalhados encontram-se no anexo G, tabelas G-1 a G-4. Como se pode verificar na figura 5.46, a variação que se faz notar é sobretudo resultado da variação da temperatura, ou seja para uma variação de 3,5°C no valor da sobre-elevação da temperatura do motor, verificou-se uma variação das perdas adicionais em carga de 9,22 W. em termos percentuais, estes dados representam uma variação da temperatura de + 16,75% para uma variação de + 17,48% nas perdas adicionais em carga.

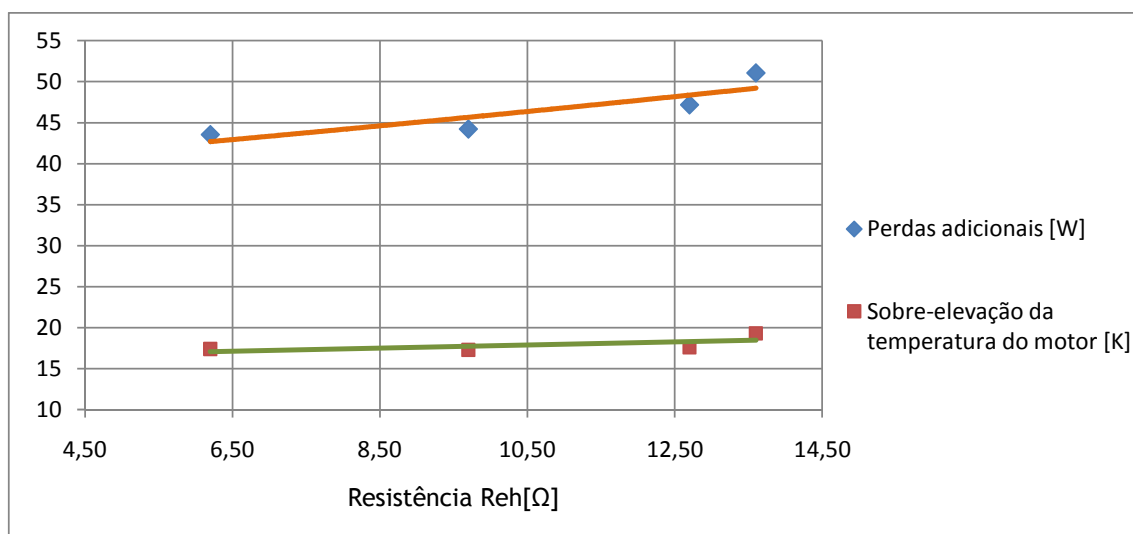


Figura 5.46 - Variação das perdas adicionais em carga com a resistência R_{eh} .

Na figura 5.47 podemos ainda ver a variação do rácio da corrente de sequência positiva face à corrente de sequência negativa.

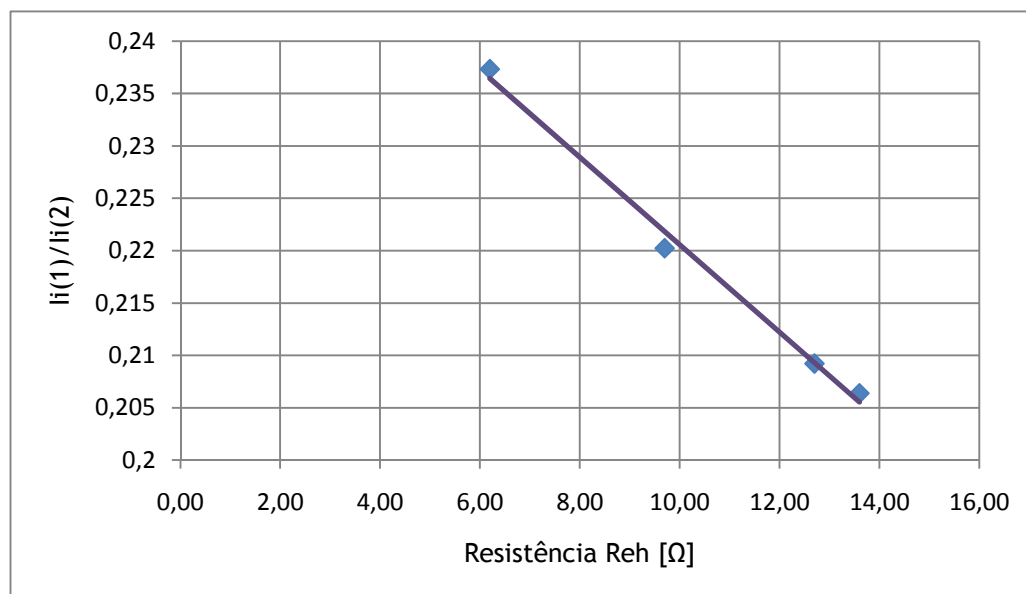


Figura 5.47 - Variação da corrente com a resistência R_{eh} .

5.12.3-Conclusões

Analisando as perdas adicionais obtidas através dos três métodos verifica-se que o método que menos beneficia os construtores é o método de imputação prévia de perdas (adicionais em carga) da actual norma. O método Eh-star parece confirmar-se como uma solução de compromisso. Se por um lado as perdas adicionais obtidas através deste método são superiores às obtidas através da anterior norma, também é verdade que parece defender os interesses dos construtores, dado que o actual método de imputação prévia de perdas (adicionais em carga) parece ser bastante penalizador, pelo menos em motores de pequena potência nominal, como o ensaiado.

Capítulo 6

Análise crítica e conclusões

Este trabalho teve como principal objectivo o levantamento das possíveis dificuldades inerentes à implementação em laboratório do ensaio Eh-star, tais como:

- a dificuldade em dispor dos equipamentos de medida com a precisão requerida pela norma IEC 60034-2-1;
- a dificuldade de interpretação da norma;
- a dificuldade de execução do ensaio e posterior processamento dos resultados;
- as dificuldades associadas aos ensaios complementares necessários à execução do ensaio Eh-star.

É neste contexto que serão apresentadas de seguida as principais dificuldades encontradas durante a elaboração deste trabalho, nomeadamente aquelas que levantaram um maior grau de complexidade na sua resolução.

6.1-Dificuldades

Durante a execução do ensaio de aquecimento foram identificados alguns pontos que podem constituir um obstáculo à realização e validação dos resultados do mesmo:

- 1) Em primeiro lugar, a localização das sondas de aquisição de temperatura foi efectuada tendo em conta as limitações físicas do próprio motor, uma vez que é composto por partes metálicas sob tensão e partes móveis. Assim, as medições de temperatura não foram efectuadas directamente no enrolamento do estator, mas sim sobre o núcleo de ferro do estator, o que constitui uma fonte de incerteza sobre as medidas efectuadas.
- 2) A norma IEC60034-1 estipula um tempo máximo para a medição da resistência dos enrolamentos após a realização do ensaio de aquecimento. Para a máquina ensaiada, 30 segundos é o tempo para o qual se aceita como válida a medição efectuada, ou um máximo de 60 segundos, desde que efectuadas medidas complementares intervaladas de um minuto, até que seja visível um decréscimo do valor máximo, e extrapolado o valor da resistência através de uma regressão linear. A execução deste procedimento, em tempo válido, requer meios de desligação automáticos e pessoal especializado e em número adequado que não estão disponíveis no laboratório onde foi efectuado este ensaio.

Significa isto que, para realizar a medição da resistência no tempo imposto, será necessário dispor de um equipamento que permita sobrepor uma corrente DC de medida à corrente que circula no estator.

6.2-Prós e contras do método Eh-star

A realização deste estudo permitiu ao autor identificar alguns pontos que poderão abonar em favor ou em prejuízo do método de ensaio Eh-star.

6.2.1-Prós

Como se pode comprovar a partir do capítulo anterior, o valor de perdas adicionais em carga para o motor ensaiado, obtido através do método Eh-star, difere em 18W do valor obtido através do método de imputação prévia de perdas (adicionais em carga), que vigorou até à publicação da actual IEC60034-2-1. Esta diferença de valores, embora representando uma variação bruta de 37%, apenas afecta as perdas no motor em cerca de 3% e a sua eficiência estipulada em 0,3%.

O que não deixa de poder ser considerado como significativo, nomeadamente à medida que vão crescendo os valores declarados para o rendimento estipulado dos motores de indução trifásicos e perante mercados cada vez mais globalizados. Mas o importante será sempre que exista um método de determinação deste tipo de perdas aceite e aplicado por toda a comunidade industrial.

6.2.2-Contras

Embora o método Eh-star demonstrar não ser de elevada dificuldade de realização, apresenta alguns inconvenientes que poderão significar um aumento significativo dos custos de ensaio. A principal questão que se coloca neste ensaio é o facto de o laboratório de ensaios necessitar de estar provido de um lote significativo de resistências de potência que abranja toda a gama de potências de motores. Outra questão que pode constituir um aumento do custo de ensaio é a questão do tempo de ensaio. Isto é especialmente importante para motores de elevadas potências estipuladas pois, com o aumento da potência do motor, exigir-se-ão resistências de ensaio muito baixas. Este facto leva a que seja muito mais complicado garantir o valor da resistência R_{eh} que limita a componente de sequência positiva da corrente de ensaio a 30% do valor da componente de sequência negativa.

6.3-Discussão

Através dos valores apurados ao longo deste trabalho, é possível verificar que o método de ensaio Eh-star apresenta bons resultados, principalmente se tivermos em conta que tais resultados foram obtidos num laboratório que não pode ser comparado aos grandes laboratórios de ensaio.

A questão que se coloca perante estes dados é saber até que ponto a exigência de métodos de ensaio mais rigorosos traz benefícios reais para o consumidor, ou seja, até que ponto o consumidor valoriza estas questões. Com a introdução da nova norma IEC 60034-2-1,

passou-se de uma simples operação aritmética para determinar as perdas adicionais em carga - assunção de um valor estipulado, baseado numa percentagem da potência consumida pelo motor e indexado ao binário produzido pelo mesmo - para um método que exige a realização de um ensaio em laboratório. Se, por um lado, a normalização dos procedimentos de determinação de perdas adicionais em carga traz vantagens no que respeita à maior transparência de mercado - comparação entre motores fabricados por diferentes empresas - também é certo que traz custos acrescidos, que terão necessariamente que ser suportados pelos consumidores finais dos equipamentos.

6.4-Trabalhos futuros

O trabalho realizado mostrou algumas possibilidades para explorar em trabalhos futuros, de entre as quais se destaca um possível aprofundamento da questão da influência da resistência R_{eh} no valor final das perdas adicionais em carga, assunto este que, reconhece-se, não foi possível esclarecer completamente neste trabalho.

Referências

- [1] Paul Waide, Energy efficiency in motor driven systems - some findings from the IEA workshop, SEEEM Launch London, June 2006.
- [2] Paul Ryan, Benchmarking of Electric Motor Efficiency in Five Asian Countries, National Appliance & Equipment Energy Efficiency Committee - Autumn Forum, 2005
- [3] I. Boldea, S. A. Nasar, The Induction Machine Handbook, CRC Press, 2002, ISBN 0849300045, 9780849300042
- [4] <http://www.teslasociety.com/strasbourg.htm>
- [5] <http://www.sciencemuseum.org.uk/images/I056/10323393.aspx>
- [6] <http://www.copper.org.sg/v2/public/uploads/newsletter/newslet08q1/motorSection.jpg>
.
- [7] Zhao Yuejin et al. (CNIS): Technical Supporting Report for national Standard Revision for Electric Motors in China, Beijing China, 2006.
- [8] Anibal T. de Almeida, F. Ferreira and D. Both, "Technical and Economical Considerations in the Application of Variable Speed Drives with Electric Motor Systems", IEEE Industrial and Commercial Power Systems Conference, Clearwater Beach, FL USA, IEEE Industrial Applications Transactions, Vol. 41, No. 1, pp 188-199, January-February 2005.
- [9] Conrad U. Brunner, Anne Arquit Niederberger, Anibal T. de Almeida, Hans de Keulenaer, Standards for efficient electric motor systems SEEEM building a worldwide community of practice, EEMODS Proceedings 2007.
- [10] Conrad U. Brunner, A + B International, International harmonization of motor standards saves energy, APEC Workshop, 3 December 2007, Beijing (revised July 2008).
- [11] Anibal T. de Almeida, e outros: EUP Lot 11 Motors Final Report, Coimbra Portugal, February, 2008 in: ecomotors.org.

- [12] Ali Emadi, Energy-Efficient Electric Motors, Third Edition, ISBN 0824757351, 2004.
- [13] International Standards for the Induction Motor Efficiency Evaluation: a Critical Analysis of the Stray-Load Loss Determination, A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, M. Pastorelli, Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 40, Issue 5, Sept.-Oct. 2004
- [14] Jürgen Sander, President of CEMEP: Activities of CEMEP to Promote Efficient Motor Driven Systems, VEM Motors GmbH, Wernigerode, eemods Conference Proceedings, Germany, September 2005.
- [15] Gilbert A. McCoy, Todd Litman, John G. Douglass: Energy-Efficient Electric Motor Selection Handbook, Washington State Energy Office, Revision 3, January 1993.
- [16] Ozan Dogruer, European Integral Horsepower Motors Market, 2003, <http://www.frost.com>.
- [17] Almeida, A.; Ferreira, F.; Fong, J.; Conrad, B.: "Electric Motor Standards, Ecodesign and Global Market Transformation", IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, Conf. Proc., May 2008.
- [18] Boteler R., Emerson Motor Co, "US Motor Market Status Report" EEMODS Proceedings, 5 - 8 September 2005, Heidelberg, Germany.
- [19] P. L. Alger, G. Angst, E. John Davies, Stray-Load Losses in Polyphase Induction Machines, Trans. AIEE, April 1959, pag .349-355.
- [20] Jimoh, A.A., Findlay, R.D. & M. Poloujadoff. "Stray losses in induction machines: Part I definition, origin and measurement", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104 [6]: 1500-1505.
- [21] STEPHEN CZARNUCH, B.ENG. & MGMT, "INTER-BAR CURRENTS IN ROTATING STATOR INDUCTION MACHINES", McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, December, 2005.
- [22] N. Christofides, "Origins of load losses in induction motors with cast aluminium rotors", Proc. IEE, Vol. 112, December 1965.
- [23] S.S.L. Chang, "Physical Concepts of Stray Load Loss in Induction Machines" FEBRUARY 1954.
- [24] C. N. G. Iew, "STRAY LOAD LOSSES IN INDUCTION MOTORS; A CHALLENGE TO ACADEMIA", EMD97 1-3 September 1997.

- [25] M. Aoulkadi and A. Binder "Evaluation of different measurement methods to determine stray load losses in induction machines," *Proc. Int. SPEEDAM Taormina, Italy*, May 23-26, 2006, p. 949.
- [26] M. Aoulkadi, A. Binder "Comparison of different evaluation methods to determine stray load losses in induction machines with Eh-star method," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, Nov. - dec., 2008, p. 1675-1682.
- [27] C. Gerada , K. Bradley and J. Arellano-Padilla "An investigation into the suitability of unbalanced motor operation, the Eh-star-circuit for stray load loss measurement," *Conf. Rec. 40th IEEE IAS Annu. Meeting Hong Kong*, vol. 2, 2005, p. 1329.
- [28] M. Aoulkadi and A. Binder "The Eh-star method for determination of stray load losses in cage induction machines," *Proc. 4th Int. Conf. EEMODS Heidelberg, Germany*, vol. 1, Sep. 5-8, 2005, p. 130.
- [29] M. Aoulkadi and A. Binder "When loads stray: Evaluation of Different Measurement Methods to Determine Stray Load Losses in Induction Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume 2, March 2008, P. 21 - 30.
- [30] IEC 60034-2-1 (Edition 1.0, 2007): Rotating electrical machines: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles).
- [31] IEC 60034-1 (Edition 11, 2004): Rotating electrical machines: Rating and performance.
- [32] Guedes, Manuel Alves de Bacelar Vaz. "3ª Reunião Inter-Linhas de Investigação de Máquinas Eléctricas" 16 de Dezembro de 1987, Porto.
- [33] Frank Cerra, The new IEC 60034-2-1 test method standard, MEPSA conference, Sydney, February 2009.

Anexo A

**Folha de cálculo das Resistências dos vários
ensaios**

Medição da resistência do estator a frio				
Terminais		U1-U2	V1-V2	W1-W2
Temperatura ambiente	T _{AMB} [°C]	18,00	18,00	18,00
Corrente no enrolamento	I _{DC} [A]	2,36	2,34	2,34
Tensão no enrolameto	V _{DC} [V]	5,19	5,22	5,22
Resistência de fase	R _f [Ω]	2,159	2,191	2,191
Resistência entre par de terminais	R _{L,j-k} [Ω]	1,447	1,457	1,457
Resistência entre par de terminais - Média	R _L [Ω]	1,454		
Medição da resistência do estator a quente - Final do ensaio de aquecimento				
Ligação dos enrolamentos	Triângulo			
Terminais		U1-V1	V1-W1	W1-U1
Temperatura ambiente	T _{AMB} [°C]	22,80	22,80	22,80
Temperatura estator	T _S [°C]	66,80	66,80	66,80
Corrente no enrolamento	I _{DC} [A]	2,58	2,58	2,58
Tensão no enrolameto	V _{DC} [V]	4,57	4,52	4,56
Resistência entre par de terminais	R _{L,j-k} [Ω]	1,740	1,720	1,736
Resistência entre par de terminais - Média	R _L [Ω]	1,732		
Resistência entre par de terminais@ temperatura	R _L [Ω]	1,734		
Medição da resistência do estator a quente - Final do ensaio em vazio				
Ligação dos enrolamentos	Triângulo			
Terminais		U1-V1	V1-W1	W1-U1
Temperatura ambiente	T _{AMB} [°C]	20,60	20,60	20,60
Temperatura estator	T _S [°C]	53,50	53,50	53,50
Corrente no enrolamento	I _{DC} [A]	2,64	2,62	2,62
Tensão no enrolameto	V _{DC} [V]	4,41	4,35	4,36
Resistência entre par de terminais	R _{L,j-k} [Ω]	1,639	1,629	1,632
Resistência entre par de terminais - Média	R _L [Ω]	1,633		
Resistência entre par de terminais@ temperatura	R _L [Ω]	1,658		
Medição da resistência do estator a quente - Final do ensaio em carga				
Ligação dos enrolamentos	Triângulo			
Terminais		U1-V1	V1-W1	W1-U1
Temperatura ambiente	T _{AMB} [°C]	19,30	19,30	19,30
Temperatura estator	T _S [°C]	60,70	60,70	60,70
Corrente no enrolamento	I _{DC} [A]	2,55	2,55	2,55
Tensão no enrolameto	V _{DC} [V]	4,38	4,38	4,38
Resistência entre par de terminais	R _{L,j-k} [Ω]	1,686	1,686	1,686
Resistência entre par de terminais - Média	R _L [Ω]	1,686		
Resistência entre par de terminais@ temperatura	R _L [Ω]	1,699		
Resistência dos condutores de ligação				
Fase		Tensão[V]	corrente[A]	R[Ω]
u		0,087	4,010	0,022
v		0,073	4,010	0,018
w		0,055	3,990	0,014

Anexo B

Folha de cálculo do Ensaio de Aquecimento

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Ensaio de aquecimento

Dados do Motor																					
Fabricante:	WEG				Grau de proteção:				IP55												
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1				Tamanho:				132S												
Tipo de motor:	IEC Design N				Tensão Nominal:				400												
Número de Série:	20APR04BM53734				Tipo de aplicação do motor:				S1												
Potência (kW):	5,5				Classe de Isolamento:				F												
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500				Temperatura Ambiente (°C)				40												
Velocidade à plena carga (RPM):	1465				Ligação dos enrolamentos:				Triângulo												
Escala de tempo			-	0.63	1.00	1.50	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.33	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	5.25	5.50
Hora de medição			-	11:52:00	12:30:00	13:00:00	13:30:00	13:45:00	14:00:00	14:15:00	14:30:00	14:50:00	15:00:00	15:15:00	15:30:00	15:45:00	16:00:00	16:15:00	16:30:00	16:45:00	17:00:00
Temperatura ambiente			T _{AMB} [°C]	16,80	20,00	20,10	21,10	20,80	21,10	21,90	21,00	21,90	21,40	21,20	21,80	21,40	21,70	21,50	22,50	22,70	23,10
Temperatura do estator			T _s [°C]	27,80	56,20	67,20	65,20	65,40	65,50	65,40	65,60	65,30	65,30	65,60	65,90	66,70	66,90	66,90	67,00	66,80	67,10
Temperatura sonda externa			[°C]	22,30	46,30	57,20	57,60	58,00	58,20	58,30	57,80	56,90	57,00	57,20	57,00	58,30	58,70	59,60	58,70	58,80	59,30
Sobre elevação da temperatura			ΔT [°C]	11,00	36,20	47,10	44,10	44,60	44,40	43,50	44,60	43,40	43,90	44,40	44,10	45,30	45,20	45,40	44,50	44,10	44,00
Variação			[°C/h]	-	-	-	7,90	-	-2,70	-	0,50	-	-0,50	0,90	-0,50	1,90	1,30	1,00	0,40	-1,20	-1,20
Tensão da rede			U [V]	-	398,90	399,74	399,84	399,73	399,76	399,74	399,81	399,80	399,74	399,74	399,77	400,12	400,04	399,93	400,12	400,00	399,92
Corrente no estator			I [A]	-	12,03	10,51	10,49	10,49	10,37	10,52	10,51	10,37	10,52	10,50	10,36	10,64	10,64	10,70	10,33	10,42	10,38
Potência de entrada			P _{ele,in} [kW]	-	7,15	6,18	6,16	6,14	6,05	6,15	6,07	6,09	6,15	6,11	6,02	6,38	6,12	6,28	5,99	6,11	6,06
Frequência da rede			f [Hz]	-	49,88	50,01	50,01	50,01	50,02	50,01	50,02	50,01	50,01	50,01	50,00	49,99	50,00	50,00	50,01	50,02	50,02
Fator de potência			cosφ	-	0,87	0,85	0,85	0,85	0,84	0,85	0,85	0,84	0,85	0,85	0,84	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Binário mecânico (1)			T _{mec} [kg.m]	-	4,22	3,71	3,65	3,70	3,50	3,64	3,67	3,58	3,64	3,68	3,50	3,74	3,67	3,69	3,64	3,66	3,65
Velocidade de rotação			n [r.p.m.]	-	1458,5	1466,4	1468,0	1467,7	1466,8	1467,3	1469,3	1469,3	1467,6	1467,6	1467,5	1465,9	1467,2	1466,9	1466,7	1466,9	1468,5
Velocidade angular			ω [rad/s]	-	152,73	153,56	153,73	153,70	153,60	153,66	153,66	153,86	153,69	153,69	153,68	153,51	153,64	153,61	153,59	153,61	153,78
Velocidade de sincronismo			n _s [r.p.m.]	-	1496,40	1500,30	1500,15	1500,39	1500,51	1500,45	1500,45	1500,39	1500,39	1500,30	1500,06	1499,70	1500,09	1499,91	1500,36	1500,69	1500,69
Potência mecânica			P _{mec} [kW]	-	6322,90	5588,87	5504,48	5578,75	5273,96	5532,01	5403,70	5487,91	5548,21	5276,47	5632,14	5531,63	5560,64	5484,54	5515,43	5506,36	5506,36
Rendimento			η [%]	-	88,49%	90,49%	89,42%	90,86%	87,17%	91,14%	88,79%	88,79%	89,19%	90,78%	87,72%	88,29%	90,37%	88,55%	91,55%	90,24%	90,89%
Deslizamento			s [%]	-	2,53%	2,26%	2,14%	2,18%	2,25%	2,21%	2,07%	2,07%	2,19%	2,18%	2,17%	2,25%	2,20%	2,25%	2,25%	2,15%	2,15%
Fator de correção			kθ	-	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Deslizamento corrigido			s [%]	-	2,57%	2,29%	2,17%	2,21%	2,27%	2,24%	2,09%	2,21%	2,19%	2,21%	2,19%	2,28%	2,22%	2,23%	2,26%	2,27%	2,16%

Anexo C

Folha de cálculo do Ensaio em Vazio a Tensão Variável

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Ensaio em vazio

Dados do Motor											
Fabricante:	WEG					Grau de protecção:	IP55				
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1					Tamanho :	132S				
Tipo de motor:	IEC Design N					Tensão Nominal:	400				
Número de Série:	20APR04BM53734					Tipo de aplicação do motor:	S1				
Potência (kW):	5,5					Classe de Isolamento:	F				
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500					Temperatura Ambiente (°C)	40				
Velocidade à plena carga (RPM):	1465					Ligação dos enrolamentos:	Triângulo				

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Percentagem da tensão nominal	%	112,5%	106,3%	100,0%	93,8%	87,5%	75,0%	60,0%	50,0%	35,0%	20,0%
Tensão de ensaio	[V]	450	425	400	375	350	300	240	200	140	80
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Tensão em vazio	U ₀ [V]	451,50	426,67	400,30	375,79	349,01	299,58	241,10	202,04	139,72	79,70
Corrente em vazio	I ₀ [A]	6,30	5,31	4,59	4,12	3,71	3,10	2,59	2,04	1,43	0,89
Potência de Entrada	P _{e,in} [W]	385,71	293,28	235,11	200,44	173,61	133,53	101,47	83,22	55,97	39,98
Factor de potência	Cos φ	0,078	0,074	0,074	0,075	0,078	0,084	0,094	0,120	0,163	0,329
Frequência	f [Hz]	49,98	50,00	50,01	49,95	49,91	49,92	49,93	49,93	49,94	49,94
Velocidade	n [r.p.m.]	1499,10	1499,20	1499,60	1498,30	1496,80	1497,30	1497,60	1497,30	1496,90	1494,40
Deslizamento	s [%]	0,020%	0,047%	0,037%	0,016%	0,039%	0,024%	0,014%	0,040%	0,077%	0,248%
Velocidade de sincronismo	ns [r.p.m.]	1499,4	1499,9	1500,2	1498,5	1497,4	1497,7	1497,8	1497,9	1498,1	1498,1
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	22,20	21,80	21,00	20,80	20,40	20,40	21,00	20,80	20,80	20,60
Temperatura Estator	T _S [°C]	62,10	62,30	61,90	61,30	60,60	59,80	58,80	57,70	56,50	55,20
Factor correcção	kθ	1,009	1,011	1,013	1,014	1,016	1,016	1,014	1,014	1,014	1,015
Resistência do estator	R _S [Ω]	1,723	1,727	1,729	1,727	1,725	1,720	1,711	1,706	1,699	1,693
(U ₀ /U _N) ²	-	1,274	1,138	1,002	0,883	0,761	0,561	0,363	0,255	0,122	0,040
U ₀ /U _N	-	1,12875	1,067	1,001	0,939	0,873	0,749	0,603	0,505	0,349	0,199
I ₀ /I _n	-	0,600	0,506	0,437	0,392	0,354	0,295	0,247	0,195	0,136	0,085
P ₀ /P _n	-	0,070	0,053	0,043	0,036	0,032	0,024	0,018	0,015	0,010	0,007
Perdas por efeito de Joule no estator	p _s [W]	102,6	73,1	54,5	43,9	35,7	24,8	17,2	10,7	5,2	2,0
Perdas Constantes	p _k [W]	283,1	220,1	180,6	156,5	137,9	108,7	84,3	72,5	50,8	38,0
Perdas mecânicas	P _{fw} [W]	Intersecção B		34,10	Declive A		137,4	Fact. Correlação		0,9991	
Perdas magnéticas	P _{Fe} [W]	248,966	186,052	146,499	122,427	103,846	74,638	50,158	38,434	16,692	3,873
Perdas magnéticas	P _{Fe} [W]	132,14		cosφ	0,845		senφ	0,534		Ur/U _N	0,969

Anexo D

Folha de cálculo do Ensaio em Carga

Folha nº D-1

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Ensaio em carga

Dados do Motor							
Fabricante:	WEG		Grau de protecção:		IP55		
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1		Tamanho :		132S		
Tipo de motor:	IEC Design N		Tensão Nominal:		400		
Número de Série:	20APR04BM53734		Tipo de aplicação do motor:		S1		
Potência (kW):	5,5		Classe de Isolamento:		F		
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500		Temperatura Ambiente (°C)		40		
Velocidade à plena carga (RPM):	1465		Ligação dos enrolamentos:		Triângulo		
Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
Percentagem ddo binário nominal	%	130,0%	115,0%	100,0%	75,0%	50,0%	25,0%
Binário de ensaio	T [kg.m]	4,76	4,21	3,66	2,75	1,83	0,92
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Numero de Polos	2p	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Binário	T [kg.m]	4,80	4,26	3,67	2,61	1,80	0,78
Tensão	U [V]	399,51	399,79	400,10	400,01	400,28	400,14
Corrente	I [A]	13,38	11,99	10,50	8,13	6,45	5,02
Potência de entrada	P _{e,in} [W]	8180,00	7110,00	6150,00	4401,00	3060,00	1408,00
Factor de potência	Cos φ	0,880	0,860	0,846	0,783	0,682	0,401
Frequência	f [Hz]	49,97	50,09	50,00	49,98	50,03	50,09
Velocidade	n [r.p.m.]	1454,10	1463,00	1467,00	1475,40	1485,50	1497,80
Deslizamento	s [%]	3,002%	2,642%	2,200%	1,601%	1,032%	0,326%
Velocidade de sincronismo	ns [r.p.m.]	1499,1	1502,7	1500,0	1499,4	1501,0	1502,7
Velocidade angular	ω [rad/s]	152,3	153,2	153,6	154,5	155,6	156,8
Potência mecânica [kW]	P _{mec} [W]	7170,2	6402,5	5530,9	3955,9	2746,9	1200,2
T/T _N	-	1,31	1,16	1,00	0,71	0,49	0,21
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	19,50	20,20	19,70	19,80	19,40	19,80
Temperatura Estator	T _s [°C]	67,50	68,80	69,40	68,90	67,30	64,40
Factor correcção	kθ	1,093	1,093	1,094	1,095	1,096	1,097
Resistência do estator	R _s [Ω]	1,598	1,603	1,601	1,603	1,602	1,606
Deslizamento corrigido	s [%]	3,281%	2,889%	2,407%	1,753%	1,131%	0,358%
Perdas por efeito de Joule no estator	p _s [W]	429,21	345,72	264,81	158,98	100,00	60,65
Perdas por efeito de Joule no rotor	p _r [W]	249,98	191,58	138,49	72,05	31,99	4,35

(1) Nota: O binário mecânico é apresentado em kg.m devido ao facto de a balança do dinamómetro possuir ainda uma escala expressa nesta unidade de medida.

Anexo E

Folhas de cálculo do Ensaio Eh-star

**Ensaio efectuado segundo as prescrições da
norma IEC 60034-2-1.**

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Método Eh-Star

Dados do Motor

Fabricante:	WEG	Grau de protecção:	IP55
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1	Tamanho:	132S
Tipo de motor:	IEC Design N	Tensão Nominal:	400
Número de Série:	20APR04BM53734	Tipo de aplicação do motor:	S1
Potência (kW):	5,5	Classe de Isolamento:	F
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500	Temperatura Ambiente (°C)	40
Velocidade à plena carga (RPM):	1465	Ligação dos enrolamentos:	Triângulo

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
	%I _{th}	1,50	1,33	1,17	1,00	0,88	0,75
Corrente de Referência	I _{ref} [A]	8,18	7,27	6,36	5,45	4,77	4,09
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal	I _N [A]	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Corrente em Vazio	I ₀ [A]	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4
Perdas no Ferro	P _{Fe} [W]	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Perdas Mecânicas	P _{fw} [W]	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10
Tensão Nominal por Fase	U _{N,Ph} [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal por Fase	I _{N,Ph} [A]	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Impedância Nominal por Fase	Z _N [Ω]	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98
Tensão Nominal de Teste	U _t [V]	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82
Corrente Nominal de Teste	I _t [A]	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Resistência de Teste	R _{eh} [Ω]	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50
Corrente de Fase	I _U [A]	6,88	6,08	5,27	4,57	3,99	3,38
Corrente de Fase	I _V [A]	8,14	7,20	6,23	5,39	4,71	3,99
Corrente de Fase	I _W [A]	5,96	5,23	4,50	3,86	3,33	2,77
Tensão Composta	U _{UV} [V]	253,20	229,00	203,30	180,50	161,80	141,90
Tensão Composta	U _{VW} [V]	281,90	254,80	226,00	200,50	179,70	157,30
Tensão Composta	U _{WU} [V]	72,80	63,90	55,10	47,20	40,80	33,90
Potência de Entrada	P _{el} [W]	898,00	717,00	546,00	414,00	322,00	236,80
Frequência	f [Hz]	50,02	50,05	49,97	49,99	50,00	50,01
Velocidade	n [r.p.m.]	1480,60	1480,80	1478,20	1478,40	1478,30	1478,80
Deslizamento	s	0,0133	0,0138	0,0139	0,0142	0,0145	0,0144
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	18,90	19,10	19,20	19,20	19,30	19,40
Temperatura Estator	T _s [°C]	24,00	26,60	28,50	29,90	30,70	31,00
Variação de temperatura	ΔT [°C]	5,10	7,50	9,30	10,70	11,40	11,60
Resistência de Fase @ 25°C	R _{l,25°C} [Ω]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Resistência entre par de terminais @ 25°C	R _{VW,25°C} [Ω]	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482
Resistência entre par de terminais @ temperatura	R _{VW} [Ω]	4,570	4,611	4,642	4,666	4,678	4,682
Resistência entre par de terminais @ inicio	R _{VW,inicio} [Ω]	4,570	-	-	-	-	-
Resistência entre par de terminais @ final	R _{VW,final} [Ω]	-	-	-	-	-	4,682
Resistência entre par de terminais @ teste	R _{VW,ensaio} [Ω]	4,570	4,611	4,642	4,666	4,678	4,682
Resistência no Ferro	R _{Fe} [Ω]	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63
Componente Directa da Tensão	U ₍₁₎ [V]	59,149-87,548i	52,827-78,91i	46,357-69,841i	40,566-61,78i	35,817-55,183i	30,804-48,081i
Componente Inversa da Tensão	U ₍₂₎ [V]	2,947+65,277i	3,428+59,729i	3,746+53,613i	4,052+48,255i	4,315+43,843i	4,669+39,06i
Componente Directa da Corrente	I _{s,1} [A]	-0,035-1,266i	-0,035-1,145i	-0,034-1,002i	-0,032-0,882i	-0,032-0,794i	-0,031-0,701i
Componente Inversa da Corrente	I _{s,2} [A]	6,882+0,802i	6,077+0,62i	5,26+0,448i	4,55+0,286i	3,962+0,171i	3,338+0,052i
Rácio entre Componentes Directa e Inversa	I _{s,1} /I _{s,2}	0,183	0,188	0,190	0,194	0,200	0,210
	(I _{s,2} /I _t) ²	1,61	1,25	0,94	0,70	0,53	0,37
Componente Directa da Potência no Entreferro	P _{s(1)} [W]	326,297	265,509	205,214	159,576	128,007	98,250
Componente Inversa da Potência no Entreferro	P _{s(2)} [W]	217,900	173,592	131,168	96,713	73,780	52,849
Potência de Entrada de Controlo	P _{cont} [W]	891,08	709,79	539,15	408,02	317,20	233,54
Perdas Adicionais	P _{ad} [W]	69,398	53,475	36,376	25,636	17,283	8,760
Perdas Adicionais @ I _t	Intersecção B	-8,961	Declive A	48,946		Fact. Correlação	0,9995
Perdas Adicionais Corrigidas	P _{ad} [W]	79,000	61,406	45,862	34,204	25,881	18,341

Anexo F

Folhas de cálculo do Ensaio Eh-star

**Conjunto de 5 ensaios consecutivos com
temperatura não controlada e resistência Eh fixa**

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Método Eh-Star

Dados do Motor

Fabricante:	WEG	Grau de protecção:	IP55
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1	Tamanho:	132S
Tipo de motor:	IEC Design N	Tensão Nominal:	400
Número de Série:	20APR04BM53734	Tipo de aplicação do motor:	S1
Potência (kW):	5,5	Classe de Isolamento:	F
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500	Temperatura Ambiente (°C)	40
Velocidade à plena carga (RPM):	1465	Ligação dos enrolamentos:	Triângulo

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
	%I _{th}	1,50	1,33	1,17	1,00	0,88	0,75
Corrente de Referência	I _{ref} [A]	8,18	7,27	6,36	5,45	4,77	4,09
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal	I _N [A]	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Corrente em Vazio	I ₀ [A]	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4
Perdas no Ferro	P _{Fe} [W]	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Perdas Mecânicas	P _{fw} [W]	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10
Tensão Nominal por Fase	U _{N,Ph} [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal por Fase	I _{N,Ph} [A]	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Impedância Nominal por Fase	Z _N [Ω]	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98
Tensão Nominal de Teste	U _t [V]	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82
Corrente Nominal de Teste	I _t [A]	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Resistência de Teste	R _{eh} [Ω]	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50
Corrente de Fase	I _U [A]	6,76	6,05	5,27	4,53	3,93	3,40
Corrente de Fase	I _V [A]	8,07	7,21	6,27	5,38	4,69	4,04
Corrente de Fase	I _W [A]	5,97	5,30	4,58	3,89	3,34	2,83
Tensão Composta	U _{UV} [V]	256,90	234,10	208,40	183,70	163,90	145,50
Tensão Composta	U _{VW} [V]	287,90	262,20	233,40	205,60	183,30	162,40
Tensão Composta	U _{WU} [V]	80,90	71,90	62,20	52,80	45,40	38,40
Potência de Entrada	P _{el} [W]	876,10	713,50	549,60	411,20	316,60	242,00
Frequência	f [Hz]	50,02	50,05	49,96	49,99	50,00	50,01
Velocidade	n [r.p.m.]	1482,40	1482,70	1480,00	1480,70	1480,80	1481,00
Deslizamento	s	0,0122	0,0126	0,0125	0,0126	0,0129	0,0129
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	17,40	17,50	17,70	17,90	18,00	18,10
Temperatura Estator	T _s [°C]	17,40	21,20	23,40	25,10	26,20	27,00
Variação de temperatura	ΔT [°C]	0,00	3,70	5,70	7,20	8,20	8,90
Resistência de Fase @ 25°C	R _{1,25°C} [Ω]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Resistência entre par de terminais @ 25°C	R _{VW,25°C} [Ω]	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482
Resistência entre par de terminais @ temperatura	R _{VW} [Ω]	4,482	4,545	4,580	4,606	4,623	4,635
Resistência entre par de terminais @ início	R _{VW,início} [Ω]	4,479	-	-	-	-	-
Resistência entre par de terminais @ final	R _{VW,final} [Ω]	-	-	-	-	-	4,685
Resistência entre par de terminais @ teste	R _{VW,ensaio} [Ω]	4,479	4,523	4,571	4,685	4,685	4,685
Resistência no Ferro	R _{Fe} [Ω]	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63
Componente Directa da Tensão	U ₍₁₎ [V]	62,199-90,214i	56,026-81,978i	49,205-72,798i	42,654-63,879i	37,476-56,753i	32,641-50,062i
Componente Inversa da Tensão	U ₍₂₎ [V]	1,598+64,777i	2,1+59,671i	2,512+53,824i	2,821+48,204i	3,273+43,644i	3,74+39,348i
Componente Directa da Corrente	I _{s,1} [A]	-0,071-1,232i	-0,058-1,117i	-0,052-0,983i	-0,047-0,863i	-0,051-0,778i	-0,042-0,7i
Componente Inversa da Corrente	I _{s,2} [A]	6,806+0,935i	6,081+0,756i	5,292+0,573i	4,538+0,382i	3,937+0,245i	3,381+0,126i
Rácio entre Componentes Directa e Inversa	I _{s,1} /I _{s,2}	0,180	0,183	0,185	0,190	0,198	0,207
	(I _{s,2} /I _t) ²	1,59	1,26	0,95	0,70	0,52	0,38
Componente Directa da Potência no Entreferro	P _{s(1)} [W]	320,183	264,960	207,005	159,369	126,728	101,017
Componente Inversa da Potência no Entreferro	P _{s(2)} [W]	214,327	173,644	132,404	93,647	70,736	52,808
Potência de Entrada de Controlo	P _{cont} [W]	876,09	711,14	545,51	404,56	311,81	238,53
Perdas Adicionais	P _{ad} [W]	67,203	53,166	37,138	28,544	19,098	11,533
Perdas Adicionais @ I _t	Intersecção B	-5,083	Declive A	45,713		Fact. Correlação	0,9986
Perdas Adicionais Corrigidas	P _{ad} [W]	72,537	57,712	43,547	31,875	23,915	17,593

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Método Eh-Star

Dados do Motor			
Fabricante:	WEG	Grau de protecção:	IP55
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1	Tamanho:	132S
Tipo de motor:	IEC Design N	Tensão Nominal:	400
Número de Série:	20APR04BM53734	Tipo de aplicação do motor:	S1
Potência (kW):	5,5	Classe de Isolamento:	F
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500	Temperatura Ambiente (°C)	40
Velocidade à plena carga (RPM):	1465	Ligação dos enrolamentos:	Triângulo

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
	%I _{th}	1,50	1,33	1,17	1,00	0,88	0,75
Corrente de Referência	I _{ref} [A]	8,18	7,27	6,36	5,45	4,77	4,09
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal	I _N [A]	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Corrente em Vazio	I ₀ [A]	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4
Perdas no Ferro	P _{Fe} [W]	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Perdas Mecânicas	P _{fw} [W]	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10
Tensão Nominal por Fase	U _{N,Ph} [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal por Fase	I _{N,Ph} [A]	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Impedância Nominal por Fase	Z _N [Ω]	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98
Tensão Nominal de Teste	U _t [V]	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82
Corrente Nominal de Teste	I _t [A]	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Resistência de Teste	R _{eh} [Ω]	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50
Corrente de Fase	I _U [A]	6,77	5,98	5,29	4,51	3,92	3,42
Corrente de Fase	I _V [A]	8,07	7,12	6,30	5,38	4,66	4,08
Corrente de Fase	I _W [A]	5,96	5,23	4,59	3,87	3,30	2,83
Tensão Composta	U _{UV} [V]	259,30	234,10	210,90	184,70	164,10	147,10
Tensão Composta	U _{VW} [V]	289,90	261,50	235,60	206,10	183,10	163,80
Tensão Composta	U _{WU} [V]	80,70	70,90	62,30	52,50	44,90	38,40
Potência de Entrada	P _{el} [W]	897,80	717,30	569,20	420,50	321,50	251,20
Frequência	f [Hz]	50,02	50,04	49,95	49,98	50,00	50,01
Velocidade	n [r.p.m.]	1480,80	1481,40	1478,60	1479,00	1479,10	1478,70
Deslizamento	s	0,0132	0,0132	0,0133	0,0136	0,0139	0,0143
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	18,70	18,70	18,80	18,90	19,10	19,10
Temperatura Estator	T _s [°C]	29,80	32,70	34,70	35,90	36,90	37,20
Variação de temperatura	ΔT [°C]	11,10	14,00	15,90	17,00	17,80	18,10
Resistência de Fase @ 25°C	R _{1,25°C} [Ω]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Resistência entre par de terminais @ 25°C	R _{VW,25°C} [Ω]	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482
Resistência entre par de terminais @ temperatura	R _{VW} [Ω]	4,673	4,723	4,756	4,775	4,788	4,794
Resistência entre par de terminais @ início	R _{VW,início} [Ω]	4,713	-	-	-	-	-
Resistência entre par de terminais @ final	R _{VW,final} [Ω]	-	-	-	-	-	4,860
Resistência entre par de terminais @ teste	R _{VW,ensaio} [Ω]	4,713	4,748	4,778	4,860	4,860	4,860
Resistência no Ferro	R _{Fe} [Ω]	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63
Componente Directa da Tensão	U ₍₁₎ [V]	62,582-90,646i	55,823-81,592i	49,707-73,335i	42,849-63,895i	37,409-56,57i	32,944-50,378i
Componente Inversa da Tensão	U ₍₂₎ [V]	1,295+65,249i	1,945+59,55i	2,341+54,298i	2,762+48,317i	3,21+43,638i	3,686+39,705i
Componente Directa da Corrente	I _{s,1} [A]	-0,058-1,236i	-0,048-1,104i	-0,046-0,996i	-0,048-0,879i	-0,038-0,783i	-0,037-0,717i
Componente Inversa da Corrente	I _{s,2} [A]	6,804+0,956i	6,003+0,776i	5,307+0,605i	4,519+0,401i	3,907+0,255i	3,397+0,138i
Rácio entre Componentes Directa e Inversa	I _{s,1} /I _{s,2}	0,180	0,183	0,187	0,194	0,200	0,211
	(I _{s,2} /I _t) ²	1,59	1,23	0,96	0,69	0,52	0,39
Componente Directa da Potência no Entreferro	P _{s(1)} [W]	325,226	262,194	212,265	162,321	128,618	104,706
Componente Inversa da Potência no Entreferro	P _{s(2)} [W]	213,568	173,660	135,822	95,570	71,007	54,002
Potência de Entrada de Controlo	P _{cont} [W]	880,56	701,88	555,86	408,71	312,42	244,42
Perdas Adicionais	P _{ad} [W]	72,624	50,450	38,789	29,356	20,523	13,748
Perdas Adicionais @ I _t	Intersecção B	-4,582	Declive A	47,072		Fact. Correlação	0,9955
Perdas Adicionais Corrigidas	P _{ad} [W]	74,714	57,985	45,153	32,574	24,261	18,293

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Método Eh-Star

Dados do Motor			
Fabricante:	WEG	Grau de protecção:	IP55
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1	Tamanho:	132S
Tipo de motor:	IEC Design N	Tensão Nominal:	400
Número de Série:	20APR04BM53734	Tipo de aplicação do motor:	S1
Potência (kW):	5,5	Classe de Isolamento:	F
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500	Temperatura Ambiente (°C)	40
Velocidade à plena carga (RPM):	1465	Ligação dos enrolamentos:	Triângulo

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
	%I _{th}	1,50	1,33	1,17	1,00	0,88	0,75
Corrente de Referência	I _{ref} [A]	8,18	7,27	6,36	5,45	4,77	4,09
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal	I _N [A]	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Corrente em Vazio	I ₀ [A]	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4
Perdas no Ferro	P _{Fe} [W]	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Perdas Mecânicas	P _{fw} [W]	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10
Tensão Nominal por Fase	U _{N,Ph} [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal por Fase	I _{N,Ph} [A]	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Impedância Nominal por Fase	Z _N [Ω]	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98
Tensão Nominal de Teste	U _t [V]	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82
Corrente Nominal de Teste	I _t [A]	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Resistência de Teste	R _{eh} [Ω]	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50
Corrente de Fase	I _U [A]	6,75	6,02	5,26	4,51	3,94	3,40
Corrente de Fase	I _V [A]	8,06	7,18	6,27	5,37	4,69	4,04
Corrente de Fase	I _W [A]	5,94	5,26	4,55	3,84	3,31	2,82
Tensão Composta	U _{UV} [V]	260,90	237,00	210,80	185,10	165,30	146,90
Tensão Composta	U _{VW} [V]	291,00	264,20	235,00	206,20	184,00	163,50
Tensão Composta	U _{WU} [V]	80,40	71,40	61,70	52,20	44,90	38,30
Potência de Entrada	P _{el} [W]	915,70	740,70	571,70	426,10	330,00	249,40
Frequência	f [Hz]	50,01	50,04	49,96	49,98	49,99	50,01
Velocidade	n [r.p.m.]	1479,90	1480,20	1477,60	1478,10	1478,10	1478,40
Deslizamento	s	0,0136	0,0139	0,0140	0,0142	0,0145	0,0146
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	19,20	19,30	19,30	19,40	19,50	19,50
Temperatura Estator	T _s [°C]	37,90	39,80	41,50	42,40	42,90	42,70
Variação de temperatura	ΔT [°C]	18,70	20,50	22,20	23,00	23,40	23,20
Resistência de Fase @ 25°C	R _{1,25°C} [Ω]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Resistência entre par de terminais @ 25°C	R _{VW,25°C} [Ω]	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482
Resistência entre par de terminais @ temperatura	R _{VW} [Ω]	4,804	4,835	4,864	4,878	4,885	4,882
Resistência entre par de terminais @ início	R _{VW,início} [Ω]	4,860	-	-	-	-	-
Resistência entre par de terminais @ final	R _{VW,final} [Ω]	-	-	-	-	-	4,896
Resistência entre par de terminais @ teste	R _{VW,ensaio} [Ω]	4,860	4,868	4,876	4,896	4,896	4,896
Resistência no Ferro	R _{Fe} [Ω]	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63
Componente Directa da Tensão	U ₍₁₎ [V]	62,849-90,848i	56,516-82,34i	49,595-73,039i	42,855-63,866i	37,67-56,793i	32,899-50,302i
Componente Inversa da Tensão	U ₍₂₎ [V]	1,244+65,486i	1,851+60,093i	2,365+54,219i	2,887+48,392i	3,322+43,861i	3,676+39,609i
Componente Directa da Corrente	I _{s,1} [A]	-0,054-1,243i	-0,046-1,122i	-0,041-1,005i	-0,036-0,887i	-0,031-0,799i	-0,034-0,703i
Componente Inversa da Corrente	I _{s,2} [A]	6,781+0,986i	6,041+0,806i	5,271+0,603i	4,506+0,403i	3,922+0,262i	3,377+0,147i
Rácio entre Componentes Directa e Inversa	I _{s,1} /I _{s,2}	0,182	0,184	0,190	0,196	0,203	0,208
	(I _{s,2} /I _t) ²	1,58	1,25	0,95	0,69	0,52	0,38
Componente Directa da Potência no Entreferro	P _{s(1)} [W]	328,591	269,357	214,112	165,319	132,630	102,731
Componente Inversa da Potência no Entreferro	P _{s(2)} [W]	219,014	178,851	135,480	97,532	73,561	54,709
Potência de Entrada de Controlo	P _{cont} [W]	887,96	718,15	554,94	412,92	320,07	242,07
Perdas Adicionais	P _{ad} [W]	70,541	52,224	40,743	30,248	21,805	11,261
Perdas Adicionais @ I _t	Intersecção B	-4,127	Declive A	46,888		Fact. Correlação	0,9958
Perdas Adicionais Corrigidas	P _{ad} [W]	74,022	58,555	44,373	32,265	24,358	18,012

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Método Eh-Star

Dados do Motor			
Fabricante:	WEG	Grau de protecção:	IP55
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1	Tamanho:	132S
Tipo de motor:	IEC Design N	Tensão Nominal:	400
Número de Série:	20APR04BM53734	Tipo de aplicação do motor:	S1
Potência (kW):	5,5	Classe de Isolamento:	F
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500	Temperatura Ambiente (°C)	40
Velocidade à plena carga (RPM):	1465	Ligação dos enrolamentos:	Triângulo

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
	%I _{th}	1,50	1,33	1,17	1,00	0,88	0,75
Corrente de Referência	I _{ref} [A]	8,18	7,27	6,36	5,45	4,77	4,09
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal	I _N [A]	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Corrente em Vazio	I ₀ [A]	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4
Perdas no Ferro	P _{Fe} [W]	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Perdas Mecânicas	P _{fw} [W]	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10
Tensão Nominal por Fase	U _{N,Ph} [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal por Fase	I _{N,Ph} [A]	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Impedância Nominal por Fase	Z _N [Ω]	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98
Tensão Nominal de Teste	U _t [V]	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82
Corrente Nominal de Teste	I _t [A]	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Resistência de Teste	R _{eh} [Ω]	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50
Corrente de Fase	I _U [A]	6,78	5,97	5,24	4,52	3,93	3,39
Corrente de Fase	I _V [A]	8,09	7,13	6,25	5,39	4,68	4,03
Corrente de Fase	I _W [A]	5,88	5,13	4,43	3,73	3,15	2,59
Tensão Composta	U _{UV} [V]	263,90	237,10	211,10	185,40	164,00	143,80
Tensão Composta	U _{VW} [V]	293,00	263,00	234,10	205,30	181,50	158,70
Tensão Composta	U _{WU} [V]	79,80	69,70	60,10	50,60	42,70	35,10
Potência de Entrada	P _{el} [W]	962,80	763,30	597,90	451,70	347,80	266,10
Frequência	f [Hz]	50,01	50,04	49,96	49,98	49,99	50,01
Velocidade	n [r.p.m.]	1476,60	1476,70	1473,60	1473,10	1472,20	1469,90
Deslizamento	s	0,0158	0,0163	0,0168	0,0175	0,0184	0,0202
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	20,00	20,00	20,10	20,20	20,30	20,20
Temperatura Estator	T _s [°C]	54,40	56,10	57,20	57,60	57,40	56,20
Variação de temperatura	ΔT [°C]	34,40	36,10	37,10	37,40	37,10	36,00
Resistência de Fase @ 25°C	R _{1,25°C} [Ω]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Resistência entre par de terminais @ 25°C	R _{VW,25°C} [Ω]	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482
Resistência entre par de terminais @ temperatura	R _{VW} [Ω]	5,075	5,104	5,121	5,126	5,121	5,102
Resistência entre par de terminais @ início	R _{VW,início} [Ω]	5,198	-	-	-	-	-
Resistência entre par de terminais @ final	R _{VW,final} [Ω]	-	-	-	-	-	5,110
Resistência entre par de terminais @ teste	R _{VW,ensaio} [Ω]	5,198	5,177	5,158	5,110	5,110	5,110
Resistência no Ferro	R _{Fe} [Ω]	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63
Componente Directa da Tensão	U ₍₁₎ [V]	63,267-91,072i	56,172-81,554i	49,285-72,367i	42,552-63,188i	36,877-55,562i	31,566-48,189i
Componente Inversa da Tensão	U ₍₂₎ [V]	0,879+65,928i	1,744+59,963i	2,38+54,154i	3,097+48,396i	3,576+43,607i	4,108+38,969i
Componente Directa da Corrente	I _{s,1} [A]	-0,015-1,291i	-0,014-1,167i	-0,003-1,054i	0,002-0,958i	0,014-0,877i	0,025-0,825i
Componente Inversa da Corrente	I _{s,2} [A]	6,771+1,021i	5,957+0,812i	5,211+0,623i	4,471+0,41i	3,858+0,249i	3,277+0,105i
Rácio entre Componentes Directa e Inversa	I _{s,1} /I _{s,2}	0,189	0,194	0,201	0,213	0,227	0,252
	(I _{s,2} /I _t) ²	1,58	1,22	0,93	0,68	0,50	0,36
Componente Directa da Potência no Entreferro	P _{s(1)} [W]	349,875	283,161	228,381	181,858	147,732	121,635
Componente Inversa da Potência no Entreferro	P _{s(2)} [W]	219,793	177,237	138,420	101,067	73,963	52,661
Potência de Entrada de Controlo	P _{cont} [W]	910,55	724,22	568,59	431,72	332,85	255,43
Perdas Adicionais	P _{ad} [W]	89,542	66,316	50,928	41,826	34,773	29,460
Perdas Adicionais @ I _t	Intersecção B	9,515	Declive A	48,628		Fact. Correlação	0,9928
Perdas Adicionais Corrigidas	P _{ad} [W]	76,661	59,095	45,031	32,957	24,436	17,575

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Método Eh-Star

Dados do Motor			
Fabricante:	WEG	Grau de protecção:	IP55
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1	Tamanho:	132S
Tipo de motor:	IEC Design N	Tensão Nominal:	400
Número de Série:	20APR04BM53734	Tipo de aplicação do motor:	S1
Potência (kW):	5,5	Classe de Isolamento:	F
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500	Temperatura Ambiente (°C)	40
Velocidade à plena carga (RPM):	1465	Ligação dos enrolamentos:	Triângulo

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
	%I _{th}	1,50	1,33	1,17	1,00	0,88	0,75
Corrente de Referência	I _{ref} [A]	8,18	7,27	6,36	5,45	4,77	4,09
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal	I _N [A]	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Corrente em Vazio	I ₀ [A]	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4
Perdas no Ferro	P _{Fe} [W]	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Perdas Mecânicas	P _{fw} [W]	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10
Tensão Nominal por Fase	U _{N,Ph} [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal por Fase	I _{N,Ph} [A]	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Impedância Nominal por Fase	Z _N [Ω]	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98
Tensão Nominal de Teste	U _t [V]	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82
Corrente Nominal de Teste	I _t [A]	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Resistência de Teste	R _{eh} [Ω]	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50	13,50
Corrente de Fase	I _U [A]	6,78	6,04	5,28	4,53	3,94	3,41
Corrente de Fase	I _V [A]	8,09	7,21	6,29	5,40	4,68	4,06
Corrente de Fase	I _W [A]	5,86	5,16	4,49	3,75	3,14	2,69
Tensão Composta	U _{UV} [V]	265,30	240,10	213,80	186,80	164,60	146,80
Tensão Composta	U _{VW} [V]	293,90	265,80	236,90	206,70	181,90	162,10
Tensão Composta	U _{WU} [V]	79,60	70,20	60,90	50,90	42,70	36,50
Potência de Entrada	P _{el} [W]	980,00	792,20	610,10	458,30	353,30	269,50
Frequência	f [Hz]	50,01	50,02	49,96	40,98	49,99	50,01
Velocidade	n [r.p.m.]	1475,30	1475,60	1473,30	1472,60	1471,40	1471,70
Deslizamento	s	0,0166	0,0166	0,0169	-0,1979	0,0189	0,0190
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	20,40	20,50	20,50	20,70	20,70	20,80
Temperatura Estator	T _s [°C]	62,50	63,70	64,50	64,60	63,90	63,00
Variação de temperatura	ΔT [°C]	42,10	43,20	44,00	43,90	43,20	42,20
Resistência de Fase @ 25°C	R _{1,25°C} [Ω]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Resistência entre par de terminais @ 25°C	R _{VW,25°C} [Ω]	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482
Resistência entre par de terminais @ temperatura	R _{VW} [Ω]	5,207	5,226	5,240	5,238	5,226	5,209
Resistência entre par de terminais @ início	R _{VW,início} [Ω]	5,338	-	-	-	-	-
Resistência entre par de terminais @ final	R _{VW,final} [Ω]	-	-	-	-	-	5,291
Resistência entre par de terminais @ teste	R _{VW,ensaio} [Ω]	5,338	5,328	5,317	5,291	5,291	5,291
Resistência no Ferro	R _{Fe} [Ω]	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63
Componente Directa da Tensão	U ₍₁₎ [V]	63,511-91,21i	56,842-82,281i	49,98-73,214i	42,877-63,555i	37,014-55,588i	32,491-49,363i
Componente Inversa da Tensão	U ₍₂₎ [V]	0,771+66,101i	1,525+60,527i	2,063+54,662i	2,81+48,643i	3,344+43,644i	3,72+39,53i
Componente Directa da Corrente	I _{s,1} [A]	-0,003-1,302i	0,001-1,194i	-0,004-1,046i	0,004-0,954i	0,019-0,884i	0,007-0,788i
Componente Inversa da Corrente	I _{s,2} [A]	6,76+1,039i	6,012+0,838i	5,254+0,651i	4,482+0,43i	3,857+0,265i	3,335+0,145i
Rácio entre Componentes Directa e Inversa	I _{s,1} /I _{s,2}	0,190	0,197	0,198	0,212	0,229	0,236
	(I _{s,2} /I _t) ²	1,57	1,24	0,94	0,68	0,50	0,37
Componente Directa da Potência no Entreferro	P _{s(1)} [W]	355,695	294,901	229,146	182,409	149,529	117,376
Componente Inversa da Potência no Entreferro	P _{s(2)} [W]	221,673	179,670	139,272	100,533	73,390	54,414
Potência de Entrada de Controlo	P _{cont} [W]	917,79	743,75	573,68	432,59	334,18	255,29
Perdas Adicionais	P _{ad} [W]	93,089	75,002	50,939	59,768	36,889	24,412
Perdas Adicionais @ I _t	Intersecção B	10,618	Declive A	52,024		Fact. Correlação	0,9516
Perdas Adicionais Corrigidas	P _{ad} [W]	81,820	64,450	49,025	35,461	26,144	19,491

Anexo G

Folhas de cálculo do Ensaio Eh-star

Conjunto de 4 ensaios com temperatura controlada e resistência Eh variável

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Método Eh-Star

Dados do Motor			
Fabricante:	WEG	Grau de protecção:	IP55
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1	Tamanho:	132S
Tipo de motor:	IEC Design N	Tensão Nominal:	400
Número de Série:	20APR04BM53734	Tipo de aplicação do motor:	S1
Potência (kW):	5,5	Classe de Isolamento:	F
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500	Temperatura Ambiente (°C)	40
Velocidade à plena carga (RPM):	1465	Ligação dos enrolamentos:	Triângulo

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
	%I _{th}	1,50	1,33	1,17	1,00	0,88	0,75
Corrente de Referência	I _{ref} [A]	8,18	7,27	6,36	5,45	4,77	4,09
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal	I _N [A]	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Corrente em Vazio	I ₀ [A]	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4
Perdas no Ferro	P _{Fe} [W]	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Perdas Mecânicas	P _{fw} [W]	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10
Tensão Nominal por Fase	U _{N,Ph} [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal por Fase	I _{N,Ph} [A]	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Impedância Nominal por Fase	Z _N [Ω]	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98
Tensão Nominal de Teste	U _t [V]	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82
Corrente Nominal de Teste	I _t [A]	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Resistência de Teste	R _{eh} [Ω]	13,60	13,60	13,60	13,60	13,60	13,60
Corrente de Fase	I _U [A]	6,78	6,04	5,27	4,51	3,96	3,36
Corrente de Fase	I _V [A]	8,10	7,20	6,27	5,36	4,71	4,00
Corrente de Fase	I _W [A]	5,98	5,29	4,58	3,88	3,37	2,81
Tensão Composta	U _{UV} [V]	260,30	236,20	210,50	184,80	166,00	145,50
Tensão Composta	U _{VW} [V]	290,80	263,80	235,00	206,30	185,30	162,20
Tensão Composta	U _{WU} [V]	80,80	71,50	62,00	52,50	45,60	38,10
Potência de Entrada	P _{el} [W]	908,30	731,70	564,30	418,10	327,30	241,80
Frequência	f [Hz]	50,01	50,03	49,96	49,98	50,00	50,01
Velocidade	n [r.p.m.]	1480,50	1481,30	1478,90	1479,30	1480,00	1479,30
Deslizamento	s	0,0132	0,0131	0,0132	0,0134	0,0133	0,0140
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	20,30	20,30	20,20	20,30	20,40	20,50
Temperatura Estator	T _s [°C]	35,00	36,80	38,30	39,20	39,60	39,80
Variação de temperatura	ΔT [°C]	14,70	16,50	18,10	18,90	19,20	19,30
Resistência de Fase @ 25°C	R _{1,25°C} [Ω]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Resistência entre par de terminais @ 25°C	R _{VW,25°C} [Ω]	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482
Resistência entre par de terminais @ temperatura	R _{VW} [Ω]	4,735	4,766	4,794	4,807	4,813	4,814
Resistência entre par de terminais @ início	R _{VW,início} [Ω]	4,759	-	-	-	-	-
Resistência entre par de terminais @ final	R _{VW,final} [Ω]	-	-	-	-	-	4,836
Resistência entre par de terminais @ teste	R _{VW,ensaio} [Ω]	4,759	4,776	4,793	4,836	4,836	4,836
Resistência no Ferro	R _{Fe} [Ω]	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63
Componente Directa da Tensão	U ₍₁₎ [V]	62,814-90,872i	56,333-82,285i	49,591-73,156i	42,827-64,01i	37,901-57,308i	32,593-49,945i
Componente Inversa da Tensão	U ₍₂₎ [V]	1,25+65,425i	1,867+60,056i	2,379+54,188i	2,825+48,377i	3,216+44,098i	3,669+39,302i
Componente Directa da Corrente	I _{s,1} [A]	-0,062-1,247i	-0,052-1,117i	-0,047-0,982i	-0,045-0,859i	-0,044-0,779i	-0,043-0,69i
Componente Inversa da Corrente	I _{s,2} [A]	6,818+0,973i	6,067+0,787i	5,289+0,601i	4,519+0,405i	3,96+0,271i	3,347+0,141i
Rácio entre Componentes Directa e Inversa	I _{s,1} /I _{s,2}	0,181	0,183	0,185	0,190	0,197	0,206
	(I _{s,2} /I _t) ²	1,59	1,26	0,95	0,69	0,53	0,38
Componente Directa da Potência no Entreferro	P _{s(1)} [W]	328,269	266,949	208,525	159,172	128,926	99,182
Componente Inversa da Potência no Entreferro	P _{s(2)} [W]	216,543	175,773	135,449	97,077	74,058	53,465
Potência de Entrada de Controlo	P _{cont} [W]	888,58	714,53	550,18	406,78	318,82	235,79
Perdas Adicionais	P _{ad} [W]	72,648	52,980	35,635	25,040	18,030	9,142
Perdas Adicionais @ I _t	Intersecção B	-10,415	Declive A	51,058		Fact. Correlação	0,9978
Perdas Adicionais Corrigidas	P _{ad} [W]	81,425	64,251	48,641	35,338	27,046	19,265

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Método Eh-Star

Dados do Motor

Fabricante:	WEG	Grau de protecção:	IP55
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1	Tamanho:	132S
Tipo de motor:	IEC Design N	Tensão Nominal:	400
Número de Série:	20APR04BM53734	Tipo de aplicação do motor:	S1
Potência (kW):	5,5	Classe de Isolamento:	F
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500	Temperatura Ambiente (°C)	40
Velocidade à plena carga (RPM):	1465	Ligação dos enrolamentos:	Triângulo

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
	%I _{th}	1,50	1,33	1,17	1,00	0,88	0,75
Corrente de Referência	I _{ref} [A]	8,18	7,27	6,36	5,45	4,77	4,09
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal	I _N [A]	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Corrente em Vazio	I ₀ [A]	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4
Perdas no Ferro	P _{Fe} [W]	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Perdas Mecânicas	P _{fw} [W]	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10
Tensão Nominal por Fase	U _{N,Ph} [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal por Fase	I _{N,Ph} [A]	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Impedância Nominal por Fase	Z _N [Ω]	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98
Tensão Nominal de Teste	U _t [V]	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82
Corrente Nominal de Teste	I _t [A]	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Resistência de Teste	R _{eh} [Ω]	12,70	12,70	12,70	12,70	12,70	12,70
Corrente de Fase	I _U [A]	6,83	6,07	5,33	4,56	3,99	3,38
Corrente de Fase	I _V [A]	8,09	7,19	6,31	5,39	4,71	3,99
Corrente de Fase	I _W [A]	5,92	5,24	4,57	3,86	3,33	2,77
Tensão Composta	U _{UV} [V]	253,30	230,20	206,30	181,20	162,20	142,20
Tensão Composta	U _{VW} [V]	281,60	255,70	229,10	201,10	180,00	157,50
Tensão Composta	U _{WU} [V]	72,00	63,80	55,70	47,10	40,60	33,80
Potência de Entrada	P _{el} [W]	900,50	726,40	565,80	419,20	324,90	239,10
Frequência	f [Hz]	50,02	50,04	49,95	49,99	50,00	50,01
Velocidade	n [r.p.m.]	1479,20	1479,90	1477,40	1477,70	1478,00	1478,00
Deslizamento	s	0,0142	0,0141	0,0140	0,0146	0,0146	0,0148
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	20,50	20,60	20,60	20,60	20,50	20,60
Temperatura Estator	T _s [°C]	32,70	34,70	36,50	37,60	38,00	38,20
Variação de temperatura	ΔT [°C]	12,20	14,10	15,90	17,00	17,50	17,60
Resistência de Fase @ 25°C	R _{1,25°C} [Ω]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Resistência entre par de terminais @ 25°C	R _{VW,25°C} [Ω]	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482
Resistência entre par de terminais @ temperatura	R _{VW} [Ω]	4,692	4,725	4,756	4,775	4,783	4,785
Resistência entre par de terminais @ início	R _{VW,início} [Ω]	4,692	-	-	-	-	-
Resistência entre par de terminais @ final	R _{VW,final} [Ω]	-	-	-	-	-	4,782
Resistência entre par de terminais @ teste	R _{VW,ensaio} [Ω]	4,692	4,711	4,731	4,782	4,782	4,782
Resistência no Ferro	R _{Fe} [Ω]	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63
Componente Directa da Tensão	U ₍₁₎ [V]	58,979-87,312i	53,066-79,142i	47,04-70,764i	40,678-61,898i	35,837-55,216i	30,846-48,102i
Componente Inversa da Tensão	U ₍₂₎ [V]	2,918+65,31i	3,388+59,887i	3,665+54,273i	3,949+48,386i	4,248+43,937i	4,584+39,104i
Componente Directa da Corrente	I _{s,1} [A]	-0,035-1,265i	-0,036-1,134i	-0,039-1,006i	-0,035-0,882i	-0,032-0,792i	-0,031-0,698i
Componente Inversa da Corrente	I _{s,2} [A]	6,832+0,808i	6,071+0,655i	5,329+0,488i	4,546+0,307i	3,959+0,184i	3,339+0,064i
Rácio entre Componentes Directa e Inversa	I _{s,1} /I _{s,2}	0,184	0,186	0,188	0,194	0,200	0,209
	(I _{s,2} /I _t) ²	1,59	1,25	0,96	0,70	0,53	0,37
Componente Directa da Potência no Entreferro	P _{s(1)} [W]	325,156	263,510	208,062	159,511	127,753	97,857
Componente Inversa da Potência no Entreferro	P _{s(2)} [W]	218,119	179,384	138,048	98,420	74,707	53,426
Potência de Entrada de Controlo	P _{cont} [W]	885,69	713,29	554,19	409,49	317,75	233,70
Perdas Adicionais	P _{ad} [W]	67,968	46,073	32,577	23,928	16,167	7,842
Perdas Adicionais @ I _t	Intersecção B	-10,096	Declive A	47,169		Fact. Correlação	0,9940
Perdas Adicionais Corrigidas	P _{ad} [W]	75,060	59,133	45,415	32,924	24,911	17,688

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Método Eh-Star

Dados do Motor			
Fabricante:	WEG	Grau de protecção:	IP55
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1	Tamanho:	132S
Tipo de motor:	IEC Design N	Tensão Nominal:	400
Número de Série:	20APR04BM53734	Tipo de aplicação do motor:	S1
Potência (kW):	5,5	Classe de Isolamento:	F
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500	Temperatura Ambiente (°C)	40
Velocidade à plena carga (RPM):	1465	Ligação dos enrolamentos:	Triângulo

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
	%I _{th}	1,50	1,33	1,17	1,00	0,88	0,75
Corrente de Referência	I _{ref} [A]	8,18	7,27	6,36	5,45	4,77	4,09
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal	I _N [A]	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Corrente em Vazio	I ₀ [A]	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4
Perdas no Ferro	P _{Fe} [W]	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Perdas Mecânicas	P _{fw} [W]	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10
Tensão Nominal por Fase	U _{N,Ph} [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal por Fase	I _{N,Ph} [A]	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Impedância Nominal por Fase	Z _N [Ω]	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98
Tensão Nominal de Teste	U _t [V]	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82
Corrente Nominal de Teste	I _t [A]	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Resistência de Teste	R _{eh} [Ω]	9,70	9,70	9,70	9,70	9,70	9,70
Corrente de Fase	I _U [A]	6,89	6,18	5,41	4,62	4,07	3,47
Corrente de Fase	I _V [A]	8,05	7,20	6,30	5,37	4,74	4,04
Corrente de Fase	I _W [A]	5,73	5,11	4,45	3,75	3,27	2,74
Tensão Composta	U _{UV} [V]	239,70	219,00	196,50	172,60	156,20	138,00
Tensão Composta	U _{VW} [V]	262,40	239,70	214,70	188,50	170,40	150,30
Tensão Composta	U _{WU} [V]	53,80	48,10	41,80	35,20	30,70	25,80
Potência de Entrada	P _{el} [W]	889,60	722,70	560,80	413,80	327,00	243,10
Frequência	f [Hz]	50,02	50,04	49,97	49,99	50,00	50,02
Velocidade	n [r.p.m.]	1474,90	1475,40	1473,20	1474,00	1474,10	1473,80
Deslizamento	s	0,0171	0,0172	0,0172	0,0170	0,0172	0,0179
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	20,60	20,70	20,60	20,80	20,90	20,80
Temperatura Estator	T _s [°C]	32,90	34,70	36,40	37,30	38,00	38,10
Variação de temperatura	ΔT [°C]	12,30	14,00	15,80	16,50	17,10	17,30
Resistência de Fase @ 25°C	R _{1,25°C} [Ω]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Resistência entre par de terminais @ 25°C	R _{VW,25°C} [Ω]	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482
Resistência entre par de terminais @ temperatura	R _{VW} [Ω]	4,694	4,723	4,754	4,766	4,776	4,780
Resistência entre par de terminais @ início	R _{VW,início} [Ω]	4,678	-	-	-	-	-
Resistência entre par de terminais @ final	R _{VW,final} [Ω]	-	-	-	-	-	4,812
Resistência entre par de terminais @ teste	R _{VW,ensaio} [Ω]	4,678	4,706	4,736	4,812	4,812	4,812
Resistência no Ferro	R _{Fe} [Ω]	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63
Componente Directa da Tensão	U ₍₁₎ [V]	51,589-79,61i	46,75-72,616i	41,585-64,916i	36,004-56,776i	32,229-51,168i	28,074-44,963i
Componente Inversa da Tensão	U ₍₂₎ [V]	6,416+64,747i	6,385+59,583i	6,395+53,869i	6,255+47,925i	6,308+43,773i	6,331+39,102i
Componente Directa da Corrente	I _{s,1} [A]	0,014-1,333i	0,016-1,2i	0,004-1,058i	-0,925i	-0,005-0,841i	-0,009-0,743i
Componente Inversa da Corrente	I _{s,2} [A]	6,803+0,453i	6,088+0,337i	5,326+0,213i	4,529+0,076i	3,978-0,008i	3,373-0,088i
Rácio entre Componentes Directa e Inversa	I _{s,1} /I _{s,2}	0,196	0,197	0,198	0,204	0,211	0,220
	(I _{s,2} /I _t) ²	1,56	1,25	0,96	0,69	0,53	0,38
Componente Directa da Potência no Entreferro	P _{s(1)} [W]	320,527	263,662	206,542	157,553	128,613	99,465
Componente Inversa da Potência no Entreferro	P _{s(2)} [W]	218,935	176,854	136,602	95,914	74,229	53,740
Potência de Entrada de Controlo	P _{cont} [W]	875,55	709,90	549,38	403,09	318,93	237,28
Perdas Adicionais	P _{ad} [W]	62,084	48,035	32,034	24,069	17,065	8,735
Perdas Adicionais @ I _t	Intersecção B	-7,597	Declive A	44,223		Fact. Correlação	0,9974
Perdas Adicionais Corrigidas	P _{ad} [W]	69,119	55,278	42,244	30,507	23,529	16,928

Ensaio para a determinação da eficiência em Motores de Indução - Método Eh-Star

Dados do Motor			
Fabricante:	WEG	Grau de protecção:	IP55
Modelo:	Cast Iron - Improved EFF1	Tamanho:	132S
Tipo de motor:	IEC Design N	Tensão Nominal:	400
Número de Série:	20APR04BM53734	Tipo de aplicação do motor:	S1
Potência (kW):	5,5	Classe de Isolamento:	F
Velocidade de Sincronismo (RPM):	1500	Temperatura Ambiente (°C)	40
Velocidade à plena carga (RPM):	1465	Ligação dos enrolamentos:	Triângulo

Ponto de ensaio		1	2	3	4	5	6
	%I _{th}	1,50	1,33	1,17	1,00	0,88	0,75
Corrente de Referência	I _{ref} [A]	8,18	7,27	6,36	5,45	4,77	4,09
Tensão Nominal	U _N [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal	I _N [A]	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50
Corrente em Vazio	I ₀ [A]	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59	4,59
Numero de Polos	2p	4	4	4	4	4	4
Perdas no Ferro	P _{Fe} [W]	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Perdas Mecânicas	P _{fw} [W]	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10	34,10
Tensão Nominal por Fase	U _{N,Ph} [V]	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Corrente Nominal por Fase	I _{N,Ph} [A]	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06	6,06
Impedância Nominal por Fase	Z _N [Ω]	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98	65,98
Tensão Nominal de Teste	U _t [V]	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82	692,82
Corrente Nominal de Teste	I _t [A]	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45	5,45
Resistência de Teste	R _{eh} [Ω]	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20
Corrente de Fase	I _U [A]	7,07	6,29	5,48	4,69	4,13	3,53
Corrente de Fase	I _V [A]	8,09	7,21	6,27	5,35	4,71	4,03
Corrente de Fase	I _W [A]	5,54	4,92	4,26	3,60	3,14	2,63
Tensão Composta	U _{UV} [V]	226,90	207,10	185,30	163,70	148,30	131,60
Tensão Composta	U _{VW} [V]	242,50	221,00	197,60	174,50	157,80	139,90
Tensão Composta	U _{WU} [V]	33,90	30,20	26,10	22,10	19,20	16,10
Potência de Entrada	P _{el} [W]	889,00	717,20	550,30	408,20	320,80	240,10
Frequência	f [Hz]	50,04	49,96	49,97	49,99	50,01	50,02
Velocidade	n [r.p.m.]	1467,10	1465,30	1466,00	1467,10	1467,40	1467,60
Deslizamento	s	0,0226	0,0223	0,0221	0,0217	0,0219	0,0219
Temperatura Ambiente	T _{AMB} [°C]	20,90	20,80	20,90	20,90	20,90	21,00
Temperatura Estator	T _s [°C]	33,20	35,60	36,90	37,90	38,20	38,40
Variação de temperatura	ΔT [°C]	12,30	14,80	16,00	17,00	17,30	17,40
Resistência de Fase @ 25°C	R _{1,25°C} [Ω]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Resistência entre par de terminais @ 25°C	R _{VW,25°C} [Ω]	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482	4,482
Resistência entre par de terminais @ temperatura	R _{VW} [Ω]	4,694	4,737	4,757	4,775	4,780	4,782
Resistência entre par de terminais @ inicio	R _{VW,inicio} [Ω]	4,639	-	-	-	-	-
Resistência entre par de terminais @ final	R _{VW,final} [Ω]	-	-	-	-	-	4,767
Resistência entre par de terminais @ teste	R _{VW,ensaio} [Ω]	4,639	4,666	4,696	4,767	4,767	4,767
Resistência no Ferro	R _{Fe} [Ω]	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63	3632,63
Componente Directa da Tensão	U ₍₁₎ [V]	44,289-71,197i	40,298-64,814i	35,786-57,86i	31,295-50,95i	28,169-45,987i	24,711-40,623i
Componente Inversa da Tensão	U ₍₂₎ [V]	10,758+64,21i	10,352+58,782i	9,841+52,942i	9,241+47,178i	8,955+42,963i	8,617+38,448i
Componente Directa da Corrente	I _{s,1} [A]	0,084-1,448i	0,061-1,306i	0,047-1,144i	0,039-0,996i	0,027-0,893i	0,018-0,794i
Componente Inversa da Corrente	I _{s,2} [A]	6,821	6,065-0,056i	5,27-0,129i	4,485-0,2i	3,93-0,241i	3,335-0,279i
Rácio entre Componentes Directa e Inversa	I _{s,1} /I _{s,2}	0,213	0,216	0,217	0,222	0,227	0,237
	(I _{s,2} /I _t) ²	1,56	1,24	0,93	0,68	0,52	0,38
Componente Directa da Potência no Entreferro	P _{s(1)} [W]	320,441	261,316	203,621	155,900	125,481	98,098
Componente Inversa da Potência no Entreferro	P _{s(2)} [W]	220,141	178,479	135,098	96,031	74,517	54,032
Potência de Entrada de Controlo	P _{cont} [W]	877,33	706,93	540,99	399,26	313,82	235,01
Perdas Adicionais	P _{ad} [W]	59,695	43,301	29,893	21,721	13,313	6,706
Perdas Adicionais @ I _t	Intersecção B	-9,436	Declive A	43,541		Fact. Correlação	0,9982
Perdas Adicionais Corrigidas	P _{ad} [W]	68,111	53,854	40,682	29,506	22,695	16,396

Anexo H

**Conjunto de imagens obtidas através da câmara
termográfica**

